



*La investigación, su esencia y arte.*

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**TESIS**

**“IDENTIFICACIÓN DE ADULTERACIONES EN LECHE DE GANADO VACUNO DEL VALLE DE PAMPAS USANDO ESPECTROSCOPIA VIBRACIONAL”**

**Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

LI7: Caracterización de materias primas, productos y seguridad alimentaria

**CAMPO DE LA INVESTIGACIÓN Y EL DESARROLLO OCDE:**

2.00.00 INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA – 2.11.01 ALIMENTOS Y BEBIDAS

**PRESENTADO POR:**

Bach. Chavez Solano Yaser Michael

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9412-496X>

**ASESOR:**

Mg. Villanueva López, Eudes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9737-5156>

**CO-ASESOR:**

M.Sc. Hurtado Soria, Beetthssy Zzussy

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9012-7975>

**Ahuaycha - Perú**

**2026**

## FACULTAD DE INGENIERÍA

<b>ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD PRESENCIAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS</b>	
Expediente N° 02-2026-UNAT/FI-EPIA	Página 1 de 1

En esta acta, se hace constar que en el auditorium de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, ubicado en el distrito de Ahuaycha, provincia de Tayacaja, departamento Huancavelica, el día **13 de enero del 2026**, a las **11:00** horas, se reunieron los miembros del Jurado Calificador designados con Resolución de Coordinación N° 016-2024-UNAT/FI de 05 de agosto de 2024, con el propósito de llevar a cabo el **Acto de Sustentación** de la Tesis de Titulación Profesional:

### "IDENTIFICACIÓN DE ADULTERACIONES EN LECHE DE GANADO VACUNO DEL VALLE DE PAMPAS USANDO ESPECTROSCOPIA VIBRACIONAL"

Dicha tesis ha sido presentada por el Bachiller en Ingeniería en Industrias Alimentarias **YASER MICHAEL CHAVEZ SOLANO**, asesorado por el docente **Mg. EUDES VILLANUEVA LOPEZ** adscrito al Departamento Académico de Ingeniería en Industrias Alimentarias.

Después de haber calificado el informe final de tesis, escuchada la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas por el Jurado, se le declara<sup>1</sup>: Aprobado, para optar el **Título Profesional de INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**, con la calificación de 20, que corresponde a la condición<sup>2</sup>: Excelente

En consecuencia, el sustentante:

- Queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.
- NO queda en condición de recibir el indicado Título Profesional, de conformidad con las normas legales, estatutarias y reglamentarias aplicables en materia del proceso de titulación profesional.

Siendo las 12:10 horas del mismo día, mes y año, se da por concluido el Acto de Sustentación, firmando a continuación los intervinientes, en señal de conformidad de lo acontecido y consignado.

Dra. LUCÍA RUTH PANTOJA TIRADO <b>Presidente</b>	Dr. STALEIN JACKSON TAMARA TAMARIZ <b>Miembro</b>
Mg. EUDES VILLANUEVA LOPEZ <b>Asesor</b>	

1. Indicar: Aprobado y/o Desaprobado.  
2. Indicar: Excelente, Muy Bueno, Bueno, Regular y/o Desaprobado.

## CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 073-2025

EL DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO, QUIEN SUSCRIBE:

### HACE CONSTAR:

Que, la tesis titulada: "IDENTIFICACIÓN DE ADULTERACIONES EN LECHE DE GANADO VACUNO DEL VALLE DE PAMPAS USANDO ESPECTROSCOPIA VIBRACIONAL", desarrollado por el tesista de la Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias, **Chávez Solano Yaser Michael**, asesorado por el **Mg. Villanueva López Eudes**, cumple con los requisitos de conformidad de originalidad mediante (*Software Anti Plagio Turnitin*), evidenciándose en el informe de originalidad un porcentaje de similitud de veinte (20%), el cual se encuentra dentro del parámetro establecido por la Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo.

Se expide la presente constancia para los fines que estime conveniente.

Ahuaycha, 23 de diciembre de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA  
"DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO"  
  
Dr. Mario Miguel Angeles Suazo  
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Constancia: N°073-2025.  
Cc. Archivo.

## **Dedicatoria**

En primera instancia a mi padre Victorio Chavez Condori y a mi madre Susana Solano Sanchez y a todos mis hermanos, que con su ejemplo y perseverancia me enseñan a encaminarme en mis proyectos, por todo el apoyo incondicional que me brindan día a día.

### **Agradecimientos**

A Dios, por darme la oportunidad de la vida y la fortaleza necesaria para seguir adelante, permitiéndome comprender las maravillas de la creación a través de la ciencia y expresarlas mediante la ingeniería.

A la Universidad donde realicé mis estudios superiores (UNAT), por ser la segunda casa donde obtuve los conocimientos que me formaron como profesional en Ingeniería en Industrias Alimentarias, una carrera que me enseñó a comprender los procesos productivos desde la materia prima hasta el producto final, con responsabilidad, innovación y compromiso hacia la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible.

A los docentes de la universidad, por su dedicación, paciencia y valiosos consejos, que fueron guía constante durante mi formación académica y personal. Su compromiso con la enseñanza fue fundamental para alcanzar este logro.

A mis padres y hermanos, por el amor incondicional, comprensión y ayuda en todo momento. Gracias por ser la base de mi esfuerzo y la motivación que me impulsó a culminar esta importante etapa de mi vida profesional.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>X</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1. Formulación de problema.....	12
1.1.1. Problema general .....	12
1.1.2. Problemas específicos .....	12
1.2. Objetivos de la investigación .....	13
1.2.1. Objetivo general.....	13
1.2.2. Objetivos específicos .....	13
1.3. Hipótesis de la investigación.....	13
1.3.1. Hipótesis general.....	13
1.3.2. Hipótesis específicas.....	13
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1. Antecedentes .....	14
2.2. Bases teóricas .....	16
2.2.1. Leche.....	16
2.2.1.1. Definición .....	17
2.2.1.2. Composición .....	17
2.2.2. Adulteración de leche .....	18
2.2.2.1. Tipos de adulteración.....	19
2.2.2.2. Métodos clásicos para la detección de adulterantes.....	20
2.2.3. Espectroscopia vibracional .....	21
2.2.3.1. Fundamentos de la espectroscopía IR.....	22
2.2.3.2. Espectroscopía infrarrojo medio (MIR) en alimentos .....	23

2.2.4.	Quimiometría aplicada al análisis MIR .....	24
2.2.4.1.	Análisis de Componentes Principales (PCA) .....	25
2.2.4.2.	Modelo de clasificación SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy).....	25
2.3.	Bases conceptuales .....	26
2.3.1.	Leche cruda de ganado vacuno .....	26
2.3.2.	Leche adulterada .....	26
2.3.3.	Espectroscopía .....	27
2.3.4.	Espectroscopía infrarroja (IR).....	27
2.3.5.	Espectroscopía MIR.....	27
2.3.6.	Quimiometría .....	27
2.3.7.	PCA (Análisis de Componentes Principales) .....	28
<b>III.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>28</b>
3.1.	Tipo de investigación .....	28
3.2.	Diseño experimental.....	28
3.3.	Población y muestra .....	29
3.4.	Materiales, equipos y reactivos .....	29
3.4.1.	Materia prima.....	29
3.4.2.	Materiales.....	29
3.4.3.	Equipos .....	29
3.4.4.	Reactivos.....	30
3.5.	Método de análisis.....	30
3.5.1.	Identificación de las principales adulteraciones en LGV del valle de pampas. .....	30
3.5.2.	Determinación el perfil vibracional de muestras de leche adulteradas (simuladas artificialmente) de ganado vacuno (GV) usando un espectrofotómetro infrarrojo. ....	31

3.5.3.	Desarrollo de un modelo de clasificación Soft Independent Modeling Class Analogy (SIMCA) para discriminar los tipos de adulteraciones en LGV del valle de pampas.....	31
3.5.3.1.	Evaluación del uso del algoritmo SIMCA para la construcción de modelos de clasificación en muestras de leche: con y sin presencia de adulteraciones.....	31
3.5.3.2.	Identificación y verificación de los grupos funcionales responsables de la discriminación SIMCA con el tipo de muestra y equipo seleccionado, simulando adulteraciones artificiales en concentraciones conocidas. ....	32
3.6.	Análisis estadístico.....	32
3.6.1.	Hipótesis estadística (nula y alterna) .....	33
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>
4.1.	Principales zonas productoras de leche de ganado vacuno del valle de Pampas .....	34
4.2.	Identificación de adulteraciones en leche de ganado vacuno.....	35
4.2.1.	Identificación de adulteración en la leche de ganado vacuno.....	35
4.3.	Determinación de perfil vibracional de leche adulterada con espectroscopia MIR ..	37
4.4.	Desarrollo del modelo de clasificación SIMCA de las adulteraciones de leche.....	38
<b>V.</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1.</b>	<b>Zonas productoras de leche de ganado vacuno.....</b>	<b>43</b>
5.2.	Identificación de adulteraciones en leche.....	44
5.3.	Perfil vibracional de leche adulterada con espectroscopia MIR .....	46
5.4.	Modelo de clasificación SIMCA.....	48
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>VII.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>51</b>
<b>VIII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>
<b>IX.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE TABLA

<b>Tabla 1.</b> Composición química de leche de diversos mamíferos (%) .....	18
<b>Tabla 2.</b> Composición química de la leche en distintas razas de ganado vacuno (%) .....	18
<b>Tabla 3.</b> Zonas productoras del valle de pampas según procedencia.....	34
<b>Tabla 4.</b> Resultados obtenidos mediante la prueba de comparación pareada. ....	35
<b>Tabla 5.</b> Significancia para pruebas de comparación pareada .....	36
<b>Tabla 6.</b> Análisis estadístico de la prueba de comparación pareada aplicada a la identificación sensorial de adulteraciones en leche ( $p < 0,05$ ). ....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 134</b> Zonas productoras de leche de ganado vacuno del valle de pampas .....	34
<b>Figura 2:</b> Espectro MIR de la leche pura y adulteradas, mediante espectroscopía FTIR (4000 – 650 $\text{cm}^{-1}$ ).....	38
<b>Figura 3:</b> Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de agua obtenidos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) gráfico de Coomans, (c) poder de discriminación. ....	39
<b>Figura 4:</b> Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de leche en polvo obtenidos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) gráfico de Coomans, (c) poder de discriminación. ....	40
<b>Figura 5:</b> Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de almidón obtenidos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) gráfico de Coomans, (c) poder de discriminación. ....	41
<b>Figura 6:</b> Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de suero obtenidos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) gráfico de Coomans, (c) poder de discriminación. ....	42

## RESUMEN

El Valle Pampas está geográficamente constituido por cuatro distritos (Acraquia, Ahuaycha, Pampas y Daniel Hernández), en donde se produce leche de ganado vacuno (LGV) destinado al consumo local y regional, esto tiene limitaciones en el control de calidad siendo adulteradas de distintas maneras que comprometen su autenticidad y valor nutricional. El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo general identificar adulteraciones en LGV procedente de los cuatro distritos del Valle Pampas. Se simuló cinco clases de adulteraciones (L0: leche pura (control), L1: leche + agua, L2: leche + almidón, L3: leche + leche en polvo y L4: leche + suero) con la finalidad de identificar diferencias significativas entre todas las clases. Utilizando la técnica de espectroscopía infrarroja media (MIR) en combinación con el análisis quimiométrico se pudo clasificar de forma rápida dichas clases. En primer lugar, se realizaron pruebas de comparación pareada utilizando 30 consumidores, identificando el umbral mínimo de percepción de una adulteración en leche. Los resultados indicaron diferentes umbrales de percepción (L1=3%, L2=0.3%, L3=0.2% y L4=1%) comprobando así que la capacidad sensorial es limitada cuando las adulteraciones están presentes en cantidades muy bajas. Por ello, fueron analizados en el equipo de espectroscopia infrarroja media (MIR) en el rango de 4000–650  $\text{cm}^{-1}$ , esta técnica permitió obtener el perfil vibracional característico de cada adulterante. Las variaciones más marcadas se observaron en las bandas asociadas a lípidos (2920–2851  $\text{cm}^{-1}$ ), proteínas (1638–1545  $\text{cm}^{-1}$ ), carbohidratos (1083  $\text{cm}^{-1}$ ) y agua estructurada (3280  $\text{cm}^{-1}$ ), evidenciando que cada adulteración modifica de manera particular la huella espectral de la leche. Posteriormente se desarrolló un modelo quimiométrico SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) para discriminar las cinco clases estudiadas en lo cual el modelo alcanzó valores ICD mayores a 3 en todas las adulteraciones (L1=4.85; L2=4.26; L3=11.1; L4=3.15), lo que confirmó una clasificación sólida y confiable entre leche pura y leche adulterada. Estos resultados demuestran que la combinación FTIR–SIMCA es una alternativa rápida, no destructiva y de alta precisión para detectar adulteraciones en leche cruda del Valle de Pampas (VP), representando una opción viable para fortalecer la calidad e inocuidad de la cadena láctea de la región y a nivel nacional.

Palabras clave: SIMCA, Prueba Pareada, Vibraciones Moleculares, Almidón, Suero Lácteo.

## ABSTRACT

The Pampas Valley is geographically made up of four districts (Acraquia, Ahuaycha, Pampas, and Daniel Hernández), where cow's milk (LGV) is produced for local and regional consumption. This has limitations in terms of quality control, as the milk is adulterated in various ways that compromise its authenticity and nutritional value. The overall objective of this research project was to identify adulterations in LGV from the four districts of the Pampas Valley. Five types of adulteration were simulated (L0: pure milk (control), L1: milk + water, L2: milk + starch, L3: milk + powdered milk, and L4: milk + whey) in order to identify significant differences between all types. Using the mid-infrared spectroscopy (MIR) technique in combination with chemometric analysis, these types could be quickly classified. First, paired comparison tests were carried out using 30 consumers, identifying the minimum threshold of perception of adulteration in milk. The results indicated different perception thresholds (L1=3%, L2=0.3%, L3=0.2%, and L4=1%), thus confirming that sensory capacity is limited when adulterants are present in very low quantities. Therefore, they were analyzed using mid-infrared spectroscopy (MIR) equipment in the range of 4000–650  $\text{cm}^{-1}$ , a technique that allowed the characteristic vibrational profile of each adulterant to be obtained. The most marked variations were observed in the bands associated with lipids (2920–2851  $\text{cm}^{-1}$ ), proteins (1638–1545  $\text{cm}^{-1}$ ), carbohydrates (1083  $\text{cm}^{-1}$ ), and structured water (3280  $\text{cm}^{-1}$ ), showing that each adulterant modifies the spectral fingerprint of milk in a particular way. Subsequently, a SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) chemometric model was developed to discriminate between the five classes studied, in which the model achieved ICD values greater than 3 in all adulterations (L1=4.85; L2=4.26; L3=11.1; L4=3.15), confirming a solid and reliable classification between pure milk and adulterated milk. These results demonstrate that the FTIR–SIMCA combination is a fast, non-destructive, and highly accurate alternative for detecting adulteration in raw milk from the Pampas Valley (VP), representing a viable option for strengthening the quality and safety of the dairy chain in the region and nationwide.

Keywords: SIMCA, Paired Test, Molecular Vibrations, Starch, Whey.

## I. INTRODUCCIÓN

La leche de ganado vacuno es un recurso vital en la industria alimentaria y posee un alto valor nutricional. A nivel nacional, en el periodo comprendido entre enero y septiembre de 2023, la producción de leche ascendió a 1,7 millones de toneladas, lo que supuso una caída del 1,5 % con respecto a 2022. En la región de Huancavelica, se estima que la producción de leche oscilará entre 16 717 y 16 460 toneladas durante los años 2022 y 2023, lo que indicaría que esta es una región con un gran potencial lácteo (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2023). La LGV, es uno de los alimentos de mayor importancia nutricional y económica en el Perú, debido a su alto contenido de proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas y minerales esenciales para la salud humana. Sin embargo, Debido a su composición la leche es susceptible de adulteraciones que pueden comprometer su calidad y seguridad alimentaria los más frecuentes se incluyen la adición de agua, suero, leche en polvo, almidón, urea y sacarosa, con el objetivo de incrementar el volumen o alterar sus propiedades fisicoquímicas, generando serios riesgos para la salud pública y perjuicios económicos para los productores de derivados lácteos y consumidores (Calderón et al., 2013).

A nivel nacional, la industria láctea representa un sector productivo estratégico dentro de la economía agroalimentaria peruana. Según los datos del MIDAGRI (2023), la producción de leche en el Perú alcanzó aproximadamente 549 millones de litros entre enero y septiembre de 2023, lo que representó una disminución del 1,7 % respecto al año anterior. Pese a este volumen considerable, la adulteración de la leche continúa siendo un problema recurrente, especialmente en zonas rurales y de mediana producción, donde la limitada infraestructura tecnológica y la falta de control sanitario dificultan la detección temprana de fraudes. Esta situación afecta directamente la competitividad de los pequeños ganaderos y la confianza del consumidor en los productos lácteos nacionales.

En este contexto, la búsqueda de métodos analíticos confiables, rápidos y no destructivos para detectar adulteraciones ha cobrado gran relevancia. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), particularmente el accesorio de reflectancia total atenuada (ATR), ha demostrado ser una herramienta efectiva para la identificación de contaminantes o adulterantes en leche. Diversas investigaciones han validado la aplicación de la FTIR combinada con técnicas quimiométricas, como el SIMCA, para clasificar con alta precisión muestras auténticas y adulteradas (Grassi et al., 2022). Por ejemplo Sonvanshi et al. (2024) demostraron que SIMCA mostró una eficiencia de clasificación del 100 % para muestras de ghee puro (producto lácteo natural) y vanaspati (producto vegetal procesado).

En su tesis de Tunjar (2024) concluyo que el método empleado para la determinación de la adulteración de la leche con agua ultrapura, leche en polvo y harina de soja mediante espectroscopia NIR-FTIR es una herramienta fiable de detección y cuantificación. incluso a concentraciones mínimas.

En la región de Huancavelica, la actividad lechera tiene una importancia creciente dentro del desarrollo agroindustrial. La producción regional de leche se estima entre 16 460 000 y 16 717 000 litros durante los años 2022 y 2023, lo que confirma el potencial productivo de esta zona (MIDAGRI, 2023). Sin embargo, las limitaciones en tecnología analítica y control de calidad contribuyen a que los productos sean más propensos a adulteraciones. Frente a este panorama, la implementación de técnicas espectroscópicas modernas representa una oportunidad significativa para fortalecer la trazabilidad, autenticidad y competitividad de la producción láctea regional.

El Valle de Pampas, ubicado en la provincia de Tayacaja, se ha consolidado como una de las principales zonas productoras de leche en la región. Durante el periodo de enero a septiembre de 2023, la producción alcanzó aproximadamente 612 065 litros, reflejando la importancia de este valle en la economía local. No obstante, diversos reportes han señalado la presencia de adulteraciones en la leche comercializada, principalmente por adición de agua, leche en polvo, suero o almidón, lo que afecta la calidad del producto y la confianza de los consumidores. Dada esta problemática, resulta fundamental desarrollar herramientas analíticas de diagnóstico rápido y confiable que permitan verificar la pureza de la leche en el punto de producción y acopio.

## **1.1. Formulación de problema**

### ***1.1.1. Problema general***

¿Cuál será el modelo quimiométrico SIMCA que permita discriminar LGV adulterada utilizando espectroscopia vibracional?

### ***1.1.2. Problemas específicos***

- ¿Qué información se obtendrá de la producción de leche de GV del VP (Ahuaycha, Acraquia, Pampas y Daniel Hernández)?
- ¿Cuáles serán las principales adulteraciones en LGV del valle de pampas?
- ¿Cuál será el perfil vibracional de las muestras de leche adulteradas (simuladas artificialmente) de GV usando un espectrómetro infrarrojo?

- ¿Cuál será el modelo de clasificación SIMCA para discriminar los tipos de adulteraciones en LGV del Valle Pampas?

## **1.2.Objetivos de la investigación**

### **1.2.1. Objetivo general**

Desarrollar una metodología para discriminar leche de ganado vacuno adulterada utilizando espectroscopia vibracional.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Recopilar información de las zonas productoras de leche de GV del VP (Ahuaycha, Acaquia, Pampas y Daniel Hernández).
- Identificar las principales adulteraciones en LGV del valle de pampas.
- Determinar el perfil vibracional de muestras de leche adulteradas (simuladas artificialmente) de GV usando un espectrofotómetro infrarrojo.
- Desarrollar un modelo de clasificación SIMCA para discriminar los tipos de adulteraciones en LGV del Valle de Pampas.

## **1.3.Hipótesis de la investigación**

### **1.3.1. Hipótesis general**

H0: Utilizando un equipo de espectroscopia infrarroja no es viable obtener un modelo quimiométrico de discriminación SIMCA significativo ( $ICD > 3$ ) para clasificar leche de GV adulterado.

H1: Utilizando un equipo de espectroscopia infrarroja es viable obtener un modelo quimiométrico de discriminación SIMCA significativo ( $ICD > 3$ ) para clasificar leche de GV adulterado.

### **1.3.2. Hipótesis específicas**

- Se obtendrá información de la producción de LGV del Valle de Pampas (Ahuaycha, Acaquia, Pampas y Daniel Hernández).
- Se obtendrá diferentes formas de adulteración (agua, almidón, leche en polvo y suero) en LGV del Valle de Pampas.
- Es posible determinar el perfil vibracional de las muestras de leche adulteradas (simuladas artificialmente) de GV usando un espectrómetro infrarrojo.

- Se desarrollará el modelo de clasificación Soft Independent Modeling Class Analogy (SIMCA) para discriminar los tipos de adulteraciones en LGV del Valle de Pampas.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes

La adulteración de la leche constituye un problema recurrente en la industria alimentaria, afectando su calidad nutricional, la confianza del consumidor y la competitividad de los productores. En este contexto, diversas investigaciones nacionales e internacionales han desarrollado métodos analíticos rápidos y confiables para detectar adulterantes en productos lácteos mediante espectroscopía vibracional y modelos quimiométricos, destacando el uso de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y la técnica de reflectancia total atenuada (ATR).

Pereira et al., (2020) en su artículo titulado *“Determinación simultánea de la adulteración de la leche de cabra con leche de vaca y su contenido de grasas y proteínas mediante espectroscopía NIR y algoritmos PLS”*, utilizaron espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR) junto con algoritmos de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) para identificar la adulteración de leche de cabra con leche de vaca. Los autores demostraron que esta técnica es eficaz, rápida y no destructiva para evaluar la calidad de la leche, logrando detectar y cuantificar adulteraciones a bajos niveles, lo que evidencia el potencial de los métodos espectroscópicos para garantizar la autenticidad de los productos lácteos.

Ji et al., (2023) en su investigación *“Identificación de adulteración de leche de yegua con leche de vaca mediante cromatografía líquida-espectrometría de masas de alta resolución basada en enfoques proteómicos y metabolómicos”*, aplicaron análisis de proteómica y metabolómica para detectar adulteraciones en leche de yegua con leche de vaca. El estudio logró distinguir adulteraciones a niveles tan bajos como 1 %, validando la eficacia de estos métodos en la identificación de proteínas y metabolitos específicos de cada especie, contribuyendo a mejorar la trazabilidad y autenticidad de la leche.

Teixeira et al., (2020) desarrollaron el trabajo *“Herramientas de espectroscopía vibratoria y quimiometría para la autenticidad y mejora del control de seguridad en la leche de cabra”*, cuyo objetivo fue detectar fraudes en leche de cabra mediante espectroscopía NIRS y técnicas quimiométricas como PCA, k-NN, PLS-DA y SIMCA. Los resultados mostraron que la combinación de NIRS y PLS-DA alcanzó una sensibilidad y especificidad del 100 % en

la discriminación de muestras auténticas y adulteradas, confirmando la efectividad de la espectroscopía vibracional como técnica de control en la industria láctea.

De igual manera, Teixeira et al., (2020) en su artículo ***“Detección de residuos de antibióticos en leche de vaca: un estudio vibracional teórico y experimental”***, aplicaron espectroscopía infrarroja y Raman, junto con análisis quimiométrico, para identificar residuos de antibióticos en leche. El estudio permitió discriminar muestras con residuos en concentraciones bajas, demostrando la utilidad de la espectroscopía vibracional para detectar contaminantes químicos en productos lácteos y mejorar los sistemas de control de seguridad alimentaria.

Mohamed et al., (2021) evaluaron el uso de la espectroscopía infrarroja en el análisis de componentes de la leche de vaca y camello, logrando determinar proteínas, grasas, lactosa y sólidos totales con alta precisión. Este trabajo evidencia la aplicabilidad de la espectroscopía infrarroja en la caracterización de la composición de la leche, aportando una base metodológica para estudios posteriores en identificación de adulteraciones.

Jha et al., (2014) desarrollaron la investigación titulada ***“Detección y cuantificación de urea en leche mediante espectroscopia infrarroja de reflectancia total atenuada por transformada de Fourier”***, donde evaluaron la capacidad del método FTIR-ATR para identificar y cuantificar urea añadida en leche. Se analizaron 210 espectros de leche adulterada con concentraciones de 100 a 2000 ppm, aplicando modelos SIMCA y PLS que lograron coeficientes de determinación de 0,906 en calibración y 0,879 en validación. Los resultados confirmaron la viabilidad de la espectroscopía vibracional para la detección precisa de adulterantes químicos como la urea.

Limm et al., (2018) en su estudio ***“Un espectrómetro portátil de infrarrojo medio y un enfoque quimiométrico no dirigido para la detección rápida de adulteraciones de leche en polvo por motivos económicos”***, propusieron el uso de un dispositivo portátil FTIR-ATR combinado con modelos SIMCA para identificar adulteraciones con melamina en leche en polvo. Lograron clasificaciones del 100 % incluso en concentraciones inferiores al 1 %, demostrando que los espectrómetros portátiles son una herramienta práctica y eficiente para la detección rápida de adulteraciones en campo.

Du, (2024) en su investigación ***“Nuevos conocimientos sobre la identificación de leche cruda adulterada con leche en polvo: huellas espectroscópicas ATR-FTIR combinadas con aprendizaje automático y enfoques de selección de características”***, aplicó modelos de

aprendizaje automático (SVM y PLS-DA) sobre datos de espectros ATR-FTIR, alcanzando clasificaciones casi perfectas de leche adulterada. Este estudio demostró que el uso de inteligencia artificial integrada con espectroscopía mejora la precisión y rapidez de los procesos de identificación de adulteraciones en leche.

Colak et al., (2025) en el estudio *“Detección de adulteración de leche de vaca en leche de búfala mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y técnicas basadas en inteligencia artificial”*, aplicaron seis algoritmos de inteligencia artificial junto con FTIR, logrando una precisión del 90,38 % en la detección de mezclas adulteradas. La investigación resaltó el potencial de los modelos de aprendizaje automático para optimizar la clasificación de adulteraciones en diferentes tipos de leche, reduciendo la necesidad de múltiples mediciones espectrales.

Balan et al., (2020) en su estudio *“Detección y cuantificación rápida de la adulteración de sacarosa en la leche de vaca mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier de reflectancia total atenuada acoplada con análisis multivariado”*, demostraron la eficacia del FTIR-ATR y el modelado quimiométrico multivariado para diferenciar y cuantificar la sacarosa en leche. Lograron una eficiencia de clasificación del 100 % y coeficientes de determinación mayores a 0,99, validando la capacidad del método para detectar adulteraciones de tipo económico con alta exactitud.

Estos antecedentes evidencian que la espectroscopía vibracional, en combinación con técnicas de análisis multivariado e inteligencia artificial, constituye una herramienta moderna, rápida y no destructiva para la identificación de adulteraciones en leche. La integración de estas metodologías puede aplicarse con éxito en regiones productoras como el Valle de Pampas, donde la leche representa un recurso vital para la economía local y su autenticidad es esencial para garantizar la inocuidad y la confianza del consumidor.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Leche**

La leche es una secreción biológica producida por las glándulas mamarias de los mamíferos y constituye una de las fuentes naturales más completas de nutrientes, debido a su contenido equilibrado de proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas y minerales. Este fluido presenta características físicas distintivas, como un color blanco opaco generado por la dispersión de la luz en los glóbulos de grasa y las micelas proteicas, así como un sabor

ligeramente dulce derivado de la presencia de lactosa. Asimismo, sus propiedades fisicoquímicas como densidad cercana a 1.032 g/mL, pH próximo a la neutralidad y variaciones en su viscosidad reflejan tanto su complejidad estructural como su susceptibilidad a cambios asociados a la alimentación, la etapa de lactancia, la raza bovina y las condiciones ambientales (Rodiles et al., 2022).

Además de su composición, la leche destaca por su relevancia nutricional y funcional en la alimentación humana, ya que aporta aminoácidos esenciales a través de la caseína, minerales fundamentales como calcio y fósforo, y energía procedente de sus carbohidratos y lípidos. Estas características explican su importancia histórica como alimento básico y su utilidad en la elaboración de numerosos productos lácteos, lo que la convierte en una materia prima indispensable dentro de la industria de alimentos (Gómez y Mejía, 2005).

#### **2.2.1.1. Definición**

Desde una perspectiva fisiológica, la leche se entiende como la secreción producida por las glándulas mamarias de los mamíferos, cuya función principal es brindar nutrientes esenciales a las crías durante las primeras etapas de vida. En el ámbito legal y sanitario, se define como el producto obtenido mediante el ordeño higiénico, completo y continuo de una o más hembras lecheras que se encuentren en buen estado de salud y adecuadamente alimentadas. Para que pueda considerarse leche apta para consumo, este fluido no debe contener calostro ni presentar alteraciones que comprometan su composición natural (Huillca, 2020).

#### **2.2.1.2. Composición**

La composición de la leche está determinada por diversos factores relacionados con su variabilidad biológica, alterabilidad y complejidad estructural esto puede experimentar fluctuaciones según la especie y la raza, como se muestra en la tabla 1 y 2. En promedio, la leche de vacuno contiene aproximadamente 4 % de grasa, 3,6 % de proteína, 5 % de lactosa y menos de 0,2 % de minerales, todos ellos dispersos en una matriz acuosa que representa cerca del 87,7 % del total (Statsenko y Guharay, 2015). Esta proporción refleja su naturaleza coloidal y multifásica, donde los componentes lipídicos, proteicos y glucídicos se encuentran en equilibrio, confiriendo a la leche sus propiedades fisicoquímicas y su valor nutricional característico.

**Tabla 1***Composición química de la leche de diversos mamíferos (%)*

<b>Especie</b>	<b>Grasa</b>	<b>Proteína</b>	<b>Lactosa</b>	<b>Sales</b>	<b>Sólido</b>
<b>Vaca</b>	4,0	3,6	5,0	0,7	13,3
<b>Cabra</b>	3,5	3,1	4,6	0,8	12,0
<b>Oveja</b>	5,3	5,5	4,6	0,9	16,3
<b>Búfalo</b>	10,4	5,9	4,3	0,8	21,5
<b>Humana</b>	4,5	1,1	6,8	0,2	12,6

*Nota.* Statsenko y Guharay (2015)**Tabla 2***Composición química de la leche en distintas razas de ganado vacuno (%)*

<b>Origen</b>	<b>Grasa</b>	<b>Proteína</b>	<b>Lactosa</b>	<b>Ceniza</b>	<b>Sólidos no grasos</b>	<b>Sólidos totales</b>
<b>Ayrshire</b>	4,00	3,53	4,67	0,68	8,90	12,90
<b>Brown Swiss</b>	4,01	3,61	5,04	0,73	9,40	12,41
<b>Guernsey</b>	4,95	3,91	4,93	0,74	9,66	14,61
<b>Holstein F.</b>	3,40	3,32	4,87	0,68	8,86	12,26
<b>Jersey</b>	5,37	3,92	4,93	0,71	9,54	14,91

*Nota.* Magariños (2001).

### **2.2.2. Adulteración de leche**

La adulteración de la leche comprende cualquier práctica destinada a modificar su composición natural con el fin de alterar su valor comercial o encubrir defectos de calidad. Este problema afecta directamente la autenticidad del producto, su valor nutricional y la seguridad del consumidor, constituyendo uno de los principales desafíos de la industria láctea a nivel mundial. Entre las adulteraciones más habituales se encuentra la dilución con agua, considerada el fraude más frecuente debido a su simplicidad y al beneficio económico que genera, ya que reduce los sólidos totales, la densidad y el punto de congelación de la leche (Tunjar, 2024).

En zonas de producción primaria, este tipo de práctica suele estar relacionada con factores socioeconómicos, como precios injustos de acopio y limitado conocimiento técnico de los parámetros de calidad. En el Centro Poblado de Urinsaya Ccollana – Layo, por ejemplo, se

ha registrado la adición de hasta un 25 % de agua en la leche cruda, motivada principalmente por el bajo precio de compra y la falta de capacitación de los productores (Huillca, 2020).

Además de la dilución, otras adulteraciones incluyen la incorporación de sustancias destinadas a ocultar acidez, incrementar artificialmente los sólidos o prolongar la conservación, como sal, azúcar, suero en polvo, detergentes, neutralizantes y conservantes químicos. Dentro de estas prácticas también se contempla la presencia accidental de contaminantes derivados del ordeño o del manejo de equipos, lo cual puede comprometer la inocuidad del producto (Condori, 2020; Tunjar, 2024).

Si bien los programas de calidad han reducido su frecuencia, persisten adulteraciones de alto impacto sanitario, como la presencia de antibióticos, que afecta la inocuidad y la aptitud tecnológica de la leche (Villa, 2015). Frente a ello, la implementación de métodos analíticos rápidos y confiables es fundamental para garantizar un producto seguro y auténtico dentro de la cadena láctea.

#### **2.2.2.1. Tipos de adulteración**

La adulteración de la leche puede llevarse a cabo mediante diversas prácticas que alteran su composición, identidad o calidad nutricional, ya sea con fines económicos o para ocultar deterioro. En la cadena de suministro láctea pueden presentarse diversas prácticas que alteran la composición real del producto; sin embargo, la incorporación de agua, la adición de suero lácteo y la mezcla con leche en polvo reconstituida tienen una alta incidencia y repercusión en la calidad de la leche cruda. Estas prácticas modifican de manera directa los parámetros físico-químicos que permiten evaluar la autenticidad del alimento.

La adición de agua es una de las formas de fraude más extendidas debido a su simplicidad y al beneficio económico inmediato que ofrece. Esta práctica disminuye el valor nutricional del producto, reduce los sólidos totales y altera indicadores como la densidad y el punto crioscópico. En zonas rurales, la dilución se ha asociado a condiciones económicas desfavorables y a un conocimiento limitado sobre los requisitos de calidad, habiéndose documentado casos donde el volumen de agua supera un cuarto del total de leche entregada a los centros de acopio (Huillca, 2020).

La mezcla con suero lácteo representa otra adulteración relevante. Este subproducto, derivado principalmente de la fabricación de quesos, es de bajo costo, por lo que su incorporación permite incrementar el volumen sin alterar de manera evidente el aspecto del

producto. No obstante, la presencia de suero modifica la relación natural entre las proteínas lácteas, la lactosa y las sales minerales, reduciendo la calidad nutritiva y afectando los valores analíticos que caracterizan a la leche genuina (Abete, 2025).

La incorporación de leche en polvo reconstituida también constituye un fraude cuando no se declara, ya que altera la naturaleza propia de la leche cruda. Aunque se trata de un producto derivado permitido y ampliamente utilizado en la industria alimentaria, su mezcla no informada modifica el perfil composicional y puede utilizarse para modificar artificialmente los sólidos totales o enmascarar fallas en las condiciones higiénicas del proceso. Esta práctica ha sido señalada como un recurso utilizado para simular características que la leche fresca no posee (Tunjar, 2024).

Estas tres formas de adulteración generan cambios significativos en la composición físico-química del producto, lo que convierte su detección en un aspecto fundamental para la garantía de calidad. En consecuencia, metodologías rápidas y no destructivas, como la espectroscopía vibracional, resultan herramientas clave para identificar variaciones asociadas a estos fraudes de manera eficiente.

#### **2.2.2.2. Métodos clásicos para la detección de adulterantes**

La identificación de adulterantes en la leche ha estado tradicionalmente basada en técnicas analíticas consideradas métodos de referencia dentro del control de calidad. Entre ellos, los métodos fisicoquímicos han sido ampliamente utilizados debido a su fiabilidad y a su capacidad para evaluar tanto de manera cualitativa como cuantitativa las variaciones en la composición. No obstante, estas técnicas suelen requerir tiempos prolongados para la preparación de muestras y el uso de reactivos potencialmente peligrosos, lo que limita su aplicación en análisis rápidos o en entornos industriales donde se exige eficiencia operativa (Jha et al., 2016).

A estas técnicas se suman los métodos cromatográficos acoplados a espectrometría de masas, reconocidos por su elevada sensibilidad y especificidad en la detección de adulterantes orgánicos e inorgánicos. Aunque proporcionan resultados de gran exactitud, la complejidad de los equipos, su elevado costo y la necesidad de realizar análisis avanzados de datos restringen su uso a laboratorios especializados (Chen et al., 2004a). De manera similar, los métodos inmunológicos, como ELISA, permiten identificar adulterantes específicos mediante anticuerpos, pero requieren largos tiempos de incubación y múltiples etapas de lavado, además

de depender de reactivos biológicos cuyo desempeño puede variar en función de las condiciones de análisis (Hurley et al., 2004).

Las técnicas basadas en PCR y metodologías afines representan otra herramienta importante para la autenticación de la leche, especialmente en casos donde se busca identificar especies o componentes exógenos. Estas técnicas destacan por su elevada sensibilidad y por permitir análisis en tiempo real; sin embargo, el costo de los reactivos y la susceptibilidad a inhibidores presentes en la matriz alimentaria son factores que pueden afectar su rendimiento (Nagraik et al., 2019). Asimismo, algunos métodos instrumentales como la espectroscopía Raman ofrecen la ventaja de requerir una preparación mínima de la muestra y tiempos de análisis muy cortos, aunque también dependen de equipos costosos y de una interpretación compleja de los espectros obtenidos (Jha et al., 2016).

Otros enfoques clásicos incluyen las técnicas de electromigración, utilizadas para detectar proteínas exógenas, y la espectrometría de masas MALDI-TOF, cuya fortaleza radica en su capacidad para analizar muestras heterogéneas utilizando volúmenes muy pequeños. No obstante, en ambos casos se requieren equipos sofisticados y la intervención de personal especializado, y en el caso de los métodos electroforéticos, la reproducibilidad puede ser limitada (Calvano et al., 2012; Pesic et al., 2011). Finalmente, el análisis termoacústico se ha propuesto como un método rápido y económicamente accesible en comparación con las técnicas cromatográficas, aunque su implementación aún exige validaciones externas y operadores capacitados (Mohanam et al., 2002). Estos métodos han demostrado un alto poder analítico, pero su utilización suele verse restringida por el tiempo de ejecución, la necesidad de instrumentación avanzada y la manipulación intensiva de las muestras. Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de alternativas más rápidas, no destructivas y con menor dependencia de reactivos, tendencia que ha favorecido el desarrollo y la adopción de tecnologías basadas en espectroscopía vibracional, especialmente en aplicaciones de autenticación y control de calidad en productos lácteos.

### ***2.2.3. Espectroscopia vibracional***

La espectroscopía vibracional comprende un conjunto de métodos analíticos basados en el comportamiento vibratorio de los enlaces químicos cuando interactúan con radiación electromagnética. Su denominación deriva de la combinación de spectrum relacionado con la representación o imagen y skopia, que alude a la observación, lo que refleja su propósito

central: registrar una señal espectral que describa la respuesta de la materia ante la luz incidente (Tunjar, 2024).

Cada molécula posee modos vibracionales propios, y estos generan bandas características que pueden distinguirse por parámetros como frecuencia, intensidad y morfología del pico. Dichas propiedades dependen de factores estructurales como la masa de los átomos, la conformación geométrica y la fuerza de los enlaces. La interpretación de estas bandas puede abordarse desde dos enfoques: uno teórico, basado en la aplicación de la teoría de grupos para predecir vibraciones permitidas según la simetría molecular, y otro empírico, sustentado en la asignación de frecuencias típicas asociadas a grupos funcionales específicos (Larkin, 2011).

Las técnicas vibracionales más empleadas son la espectroscopía infrarroja en sus regiones cercana (NIR) y media (MIR) y la espectroscopía Raman. Aunque todas exploran los cambios en los estados vibracionales, se diferencian en su principio físico: la espectroscopía IR analiza la absorción de radiación que provoca transiciones vibracionales, mientras que Raman se basa en la dispersión inelástica de la luz por parte de la muestra. Además, IR presenta mayor sensibilidad hacia vibraciones asociadas a grupos polares y movimientos asimétricos, mientras que Raman muestra una mejor respuesta frente a vibraciones simétricas de moléculas no polares (Villanueva, 2021). En particular, la región MIR es ampliamente valorada porque contiene los modos vibracionales fundamentales de numerosos enlaces covalentes, generando espectros con elevada especificidad química. Estos espectros permiten caracterizar la composición molecular de una muestra sin necesidad de un tratamiento exhaustivo y con una intervención mínima sobre el material analizado.

### **2.2.3.1. Fundamentos de la espectroscopía IR**

La espectroscopía infrarroja (IR) se basa en la capacidad de los enlaces químicos para absorber radiación infrarroja y vibrar cuando esta energía coincide con su frecuencia natural. Como resultado, se obtiene un espectro compuesto por bandas de absorción que reflejan las diferentes vibraciones presentes en la muestra. La ubicación y la intensidad de estas bandas dependen del tipo de enlace y del nivel de energía absorbida, lo que permite interpretar la composición molecular del material analizado (Mondragón, 2020).

Para que una molécula absorba radiación infrarroja, sus vibraciones deben provocar un cambio en el momento dipolar. La radiación IR, formada por campos eléctricos y magnéticos

en oscilación, interactúa con estas variaciones y es absorbida cuando su frecuencia coincide con la vibración natural del enlace. Este principio explica por qué algunas señales del espectro son más intensas y permite identificar grupos funcionales según su comportamiento vibracional. La región más empleada es el infrarrojo medio, donde se manifiestan las vibraciones más características de los compuestos orgánicos (Paulino, 2006).

### **2.2.3.2. Espectroscopía infrarrojo medio (MIR) en alimentos**

La región del infrarrojo medio (MIR), comprendida entre 4000 y 400  $\text{cm}^{-1}$ , es una de las más utilizadas en el análisis de alimentos debido a que permite obtener información directa sobre la composición química de las muestras. En esta zona se registran señales altamente específicas de los principales grupos funcionales presentes en lípidos, proteínas y carbohidratos, lo que convierte al MIR en una herramienta eficaz para evaluar autenticidad y calidad (Cozzolino et al., 2015).

Una de las aplicaciones más relevantes del MIR es la detección de adulteraciones. El análisis espectral permite comparar la muestra con espectros de referencia previamente validados y, mediante técnicas quimiométricas, discriminar de manera precisa entre alimentos genuinos y mezclas fraudulentas. Esto ha sido especialmente útil en el control de aceites comestibles, donde la técnica ATR-FTIR una modalidad del MIR basada en reflexiones internas atenuadas ha demostrado alta capacidad para distinguir aceites de oliva puros de mezclas con aceites vegetales de menor valor comercial (Freitas et al., 2018).

El MIR también ha sido fundamental para identificar adulterantes que representan un riesgo para la salud. Un caso ampliamente estudiado es el de la melamina en leche, donde ATR-FTIR ha mostrado sensibilidad suficiente para detectar concentraciones tan bajas como 2,5 ppm, permitiendo distinguir muestras adulteradas sin necesidad de preparaciones complejas o análisis prolongados (Jawaid et al., 2013a).

Además de su utilidad en la identificación de fraudes, la espectroscopía MIR se emplea en la evaluación de parámetros de calidad. En el caso de aceites, esta técnica permite monitorear procesos de oxidación y degradación durante el almacenamiento, proporcionando información en tiempo real sobre cambios químicos asociados al deterioro del producto (Tena et al., 2017). Este enfoque ofrece una alternativa rápida y no destructiva a los métodos convencionales, que suelen ser más costosos y laboriosos.

El MIR se ha consolidado como una técnica versátil y eficiente para el análisis de alimentos, destacando por su rapidez, mínima preparación de muestra y capacidad de integrar modelos quimiométricos que mejoran la detección de adulteraciones y la evaluación de la calidad (Casale y Simonetti, 2014).

#### **2.2.4. *Quimiometría aplicada al análisis MIR***

La quimiometría es una disciplina que combina matemáticas, estadística y lógica formal para diseñar procesos analíticos eficientes y extraer la máxima información posible a partir de datos químicos complejos (Massart et al., 1998). Su relevancia en el análisis instrumental radica en que permite procesar grandes volúmenes de datos multivariados, como los obtenidos mediante espectroscopía MIR, donde cada espectro contiene miles de variables altamente correlacionadas (Brereton, 2007).

En términos prácticos, la quimiometría facilita la adquisición, el tratamiento y la interpretación de datos provenientes de sistemas multivariados, permitiendo identificar patrones, clasificar muestras y desarrollar modelos de predicción cuantitativa con alta precisión (Mongay, 2005). Entre sus aportes más importantes se encuentra la capacidad de reducir la dimensionalidad de los datos mediante técnicas estadísticas que condensan la información esencial sin perder características relevantes.

Uno de los procedimientos más utilizados es el Análisis de Componentes Principales (ACP), que reorganiza la variabilidad espectral en un conjunto reducido de componentes ortogonales, eliminando redundancia y mejorando la interpretación de las relaciones entre muestras (Miller y Miller, 2002). Este análisis constituye la base de métodos multivariantes de calibración como la Regresión por Componentes Principales (PCR) y la Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), herramientas centrales para el desarrollo de modelos predictivos robustos en espectroscopía MIR (Burns y Ciurczak, 2007).

El uso de estas técnicas permite modelar tanto la información espectral como las variaciones en la concentración de los analitos, incrementando la sensibilidad y especificidad en la detección de adulteraciones. Además, la aplicación de pruebas estadísticas, como la comparación de medias mediante pruebas t pareadas, contribuye a validar la equivalencia o superioridad de un método frente a otro y garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos (Miller y Miller, 2002).

En el análisis mediante espectroscopía MIR, la quimiometría constituye una herramienta fundamental porque permite transformar los datos espectrales en matrices interpretables, facilitar la identificación de patrones y apoyar la construcción de modelos que describen la variabilidad química de las muestras.

#### **2.2.4.1. Análisis de Componentes Principales (PCA)**

El Análisis de Componentes Principales (PCA) es una técnica estadística multivariante utilizada para reducir la dimensión de grandes matrices de datos, especialmente cuando existe colinealidad entre variables, como ocurre en los espectros MIR con numerosos números de onda. Su finalidad es concentrar la mayor cantidad de información posible en un número reducido de nuevas variables no correlacionadas, denominadas componentes principales (Jolliffe, 2002).

El PCA transforma las variables originales en combinaciones lineales que maximizan la varianza explicada. El primer componente principal recoge la mayor variabilidad del conjunto de datos y los siguientes componentes, ortogonales entre sí, describen la variación restante. Esto permite eliminar información redundante y revelar patrones dominantes difíciles de visualizar en los datos originales (Bro y Smilde, 2014).

En espectroscopia, la matriz de datos  $X$  contiene los espectros de las muestras, donde las filas representan objetos y las columnas corresponden a longitudes de onda. El PCA genera dos resultados esenciales: los scores, que muestran la posición de cada muestra en el nuevo sistema de ejes, y los loadings, que indican la contribución de cada variable a los componentes principales (García, 2015).

Los componentes pueden obtenerse buscando el subespacio que minimiza las distancias cuadráticas o la combinación lineal que maximiza la varianza. Estas propiedades garantizan que el PCA conserve la mayor información posible y, al mismo tiempo, produzca variables no correlacionadas que facilitan la interpretación de los datos (Zou y Hastie, 2005).

#### **2.2.4.2. Modelo de clasificación SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy)**

El método SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) es una técnica de clasificación supervisada ampliamente utilizada en quimiometría para diferenciar grupos de muestras a partir de sus características multivariantes. Su funcionamiento se basa en la construcción de modelos PCA independientes para cada clase, de manera que cada grupo es representado por un subespacio que refleja su variabilidad típica (Vitale et al., 2023).

En SIMCA, cada clase se modela únicamente con sus propias muestras, lo que permite capturar la estructura interna sin interferencia de otras categorías. Una muestra nueva se clasifica comparando su distancia ortogonal y distancia en scores respecto al modelo PCA construido para cada clase; si cae dentro de los límites estadísticos del modelo, se considera perteneciente a dicha clase. Este método es especialmente útil cuando las clases presentan comportamientos no lineales o variabilidad distinta, ya que no requiere que las fronteras entre clases sean estrictas. Además, SIMCA permite detectar muestras atípicas o adulteradas, ya que aquellas que no encajan en ninguno de los modelos se clasifican como “no pertenecientes” a ninguna categoría establecida. Esta característica lo convierte en un enfoque valioso en el análisis de autenticidad alimentaria y en estudios de seguridad alimentaria, especialmente cuando se emplea espectroscopía MIR y modelos quimiométricos para diferenciar productos genuinos de muestras adulteradas (Visconti, 2023).

Desde la perspectiva de la ingeniería en industrias alimentarias, SIMCA resulta una herramienta eficiente para el trabajo con datos espectrales complejos, como los generados por la espectroscopía infrarrojo medio (MIR). Su capacidad para modelar la variabilidad natural de cada producto permite discriminar entre muestras auténticas y adulteradas sin necesidad de desarrollar modelos globales o altamente restrictivos. Además, la independencia de modelos facilita su aplicación en matrices alimentarias donde las diferencias químicas entre grupos son sutiles pero relevantes a nivel analítico.

## **2.3. Bases conceptuales**

### **2.3.1. *Leche cruda de ganado vacuno***

La leche cruda se obtiene directamente del ganado vacuno durante el proceso de ordeño, sin más procesamiento. Es importante que provenga de animales sanos, bien nutridos y que el proceso de ordeño sea sanitario para garantizar calidad y seguridad de la leche (Máximo, 2024).

### **2.3.2. *Leche adulterada***

La leche adulterada es aquella cuya composición natural ha sufrido un cambio por la adición de componentes externos a su constitución, ya sea deliberadamente o por accidente. Este tipo de prácticas tiene un impacto directo sobre la calidad y la inocuidad, ya que cambia el volumen original o transforma su perfil químico. En líneas generales, la adulteración supone incorporar elementos que desfiguran las propiedades inherentes del alimento, lo cual pone en peligro su autenticidad y su valor nutricional (Chávez, 2008).

### **2.3.3. Espectroscopía**

La técnica de espectroscopia estudia la interrelación de la luz con la materia, o sea, el análisis de espectros atómicos y moleculares donde se encuentra datos sobre forma de las moléculas (simetría molecular, distancia entre enlaces y ángulos de enlaces) y propiedades químicas (la propagación de electrones, niveles de enlazamiento, procesos dentro y fuera de las moléculas) (Paulino, 2006).

### **2.3.4. Espectroscopía infrarroja (IR)**

La espectroscopía infrarroja (IR) es una técnica que mide la absorción de radiación en la región infrarroja del espectro para obtener información sobre la estructura molecular. En su versión moderna, los equipos basados en transformada de Fourier (FT-IR) registran simultáneamente múltiples longitudes de onda, lo que mejora la resolución y la relación señal/ruido. Un sistema FT-IR incluye una fuente de radiación, un interferómetro y un detector encargado de transformar la señal en un espectro interpretable (Carrasco, 2004).

### **2.3.5. Espectroscopía MIR**

La espectroscopía en el infrarrojo medio (MIR) es una técnica vibracional que analiza la absorción de radiación en el rango de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , donde se producen vibraciones moleculares específicas propias de cada compuesto. Esta región del espectro permite identificar grupos funcionales y obtener información estructural directa de las moléculas, por lo que resulta útil para caracterizar la composición química de una muestra (Bonett, 2013).

### **2.3.6. Quimiometría**

La quimiometría se entiende como la disciplina que aplica herramientas matemáticas y estadísticas para interpretar datos químicos y optimizar los procesos analíticos. En el contexto de la espectroscopía vibracional, permite trabajar con información multivariante, reducir la complejidad de los espectros y construir modelos que faciliten la clasificación o cuantificación de las muestras (Puig, 2022).

### **2.3.7. PCA (*Análisis de Componentes Principales*)**

El PCA es una técnica estadística multivariante que transforma un conjunto de variables correlacionadas en un número menor de componentes no correlacionados llamados componentes principales. Estos nuevos ejes concentran la mayor variabilidad de los datos y facilitan la interpretación de información compleja, especialmente útil en espectros vibracionales donde existen muchas variables por muestra (Puig, 2022).

## **III. METODOLOGÍA**

### **3.1. Tipo de investigación**

La presente investigación fue de tipo aplicada y experimental, ya que se orientó a la validación de una metodología instrumental para la detección de adulteraciones en leche de ganado vacuno. Se empleó un enfoque cuantitativo, sustentado en la medición de variables fisicoquímicas y espectroscópicas, y en el tratamiento estadístico de los datos mediante técnicas quimiométricas. El nivel experimental radica en la manipulación controlada de muestras adulteradas en diferentes proporciones, con el propósito de evaluar la respuesta vibracional de cada tipo de adulteración.

### **3.2. Diseño experimental**

El diseño experimental fue de tipo completamente aleatorizado con enfoque comparativo, estructurado en cinco tratamientos correspondientes a los tipos de adulteración:

- L0: leche pura (control)
- L1: leche + agua
- L2: leche + almidón
- L3: leche + leche en polvo
- L4: leche + suero

Cada tratamiento se preparó en diferentes concentraciones previamente establecidas, realizando dos repeticiones por muestra. Posteriormente, se obtuvieron los espectros infrarrojos medios (FTIR) en el rango de 4000–650  $\text{cm}^{-1}$ , los cuales fueron utilizados para el modelado quimiométrico SIMCA, con el fin de clasificar y discriminar las muestras adulteradas respecto al control.

### 3.3. Población y muestra

**Población:** Estuvo conformada por la leche fresca de GV proveniente de los principales centros productores del VP, provincia de Tayacaja, región Huancavelica.

**Muestra:** Estuvo constituida por 60 unidades de análisis (muestras de leche cruda) recolectadas en los distritos de Ahuaycha, Acraquia, Pampas y Daniel Hernández, cada una de aproximadamente 250 mL. De este total, una parte se destinó al análisis fisicoquímico, otra a la preparación de adulteraciones controladas y al análisis espectroscópico. La selección de las muestras se realizó de manera aleatoria, garantizando la representatividad de la producción local.

### 3.4. Materiales, equipos y reactivos

#### 3.4.1. *Materia prima*

La materia prima fue leche cruda de GV, recolectada en los distritos de Acraquia, Ahuaycha, Pampas y Daniel Hernández, provincia de Tayacaja, región Huancavelica.

#### 3.4.2. *Materiales*

- Tubos Falcon de 50 ml.
- Frascos de acero inoxidable esterilizados (500 mL).
- Papel tissue
- Culer
- Rotulador
- Etiquetas autoadhesivas
- Micropipetas de 2–5  $\mu$ L
- Puntas de pipetas 5  $\mu$ L

#### 3.4.3. *Equipos*

- Espectrómetro FT-IR **Cary 630** con accesorio ATR de tres rebotes (Agilent Technologies Inc®, Danbury, CT, USA).
- Analizador de calidad de leche **MILKANALYSER BOECKEL® SA50**.
- Congelador (BIOBASE®, Modelo BDF-40V328)

#### **3.4.4. Reactivos**

- Agua destilada
- Etanol 95%

#### **3.5. Método de análisis**

El método de análisis se basó en la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) en modo de reflectancia total atenuada (ATR), la cual permite identificar los grupos funcionales característicos de la leche y detectar alteraciones en su perfil vibracional. Las muestras fueron analizadas directamente sin tratamiento previo, registrando los espectros con 64 escaneos por muestra y una resolución de  $4\text{ cm}^{-1}$ .

Los datos espectrales obtenidos fueron procesados mediante análisis quimiométrico multivariado, empleando el modelo SIMCA, que permite clasificar las muestras según su similitud espectral. Además, se realizaron análisis fisicoquímicos complementarios (densidad, acidez, grasa, sólidos no grasos y proteína) y un análisis sensorial comparativo para la detección perceptible de adulteraciones.

##### **3.5.1. Identificación de las principales adulteraciones en LGV del valle de pampas.**

Para identificar las adulteraciones más frecuentes presentes en la leche de ganado vacuno producida en el Valle de Pampas, se empleó un enfoque metodológico mixto que combinó la recolección de información directa de los productores y la verificación sensorial mediante una prueba discriminativa.

En una primera etapa, se aplicó una encuesta estructurada a un total de 100 ganaderos de diferentes sectores del Valle de Pampas. El objetivo fue obtener información sobre las prácticas de manejo de la leche, el conocimiento de los productores respecto a la adulteración y la identificación de los tipos de adulteración más reportados o sospechados en la zona. Las preguntas abordaron aspectos como: adición de agua, uso de suero lácteo, incorporación de leche en polvo reconstituida y otros posibles agentes que alteran la composición original de la leche.

Posteriormente, con base en la información recopilada en las encuestas, se seleccionaron los adulterantes más frecuentemente mencionados para su evaluación sensorial. En esta segunda etapa se llevó a cabo una prueba de comparación pareada, con la finalidad de determinar si los jueces eran capaces de percibir diferencias entre muestras de leche pura y

muestras con adulteraciones representativas. El panel estuvo conformado por 30 jueces semientrenados, quienes evaluaron pares de muestras siguiendo un protocolo estandarizado de análisis sensorial bajo condiciones controladas (iluminación, temperatura y recipientes uniformes).

La combinación de ambos métodos permitió identificar las adulteraciones predominantes en la zona y, además, confirmar sensorialmente si dichas prácticas generan diferencias perceptibles en las características organolépticas de la leche.

### ***3.5.2. Determinación el perfil vibracional de muestras de leche adulteradas (simuladas artificialmente) de GV usando un espectrofotómetro infrarrojo.***

Las muestras de leche con un volumen de 10 $\mu$ l fueron analizadas por espectroscopia MIR. Se utilizó un equipo Cary 630 FT-IR (Agilent Technologies Inc., Danbury, CT), para reunir espectros en los rangos de 650 – 4000  $\text{cm}^{-1}$ . El dispositivo Cary 630 FT-IR se encontraba equipado con un accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) construido de diamante, diseñado con tres flexiones de la luz incidente y un detector de sulfato de triglicina deuterado (DGTS). Se programó un método de obtención de espectros en ambos equipos registrándose un número de 64 scans (interferogramas) y una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ . Las muestras se cuantificaron por duplicado y fueron colocados sobre la superficie del ATR previo background (señal de fondo obtenida sin muestra), esto para prevenir los efectos negativos de la alteración en el medio ambiente. La limpieza de la superficie del ATR se efectuó atentamente con alcohol de 96° y se secó con el papel tissue. La información se adquirió con el Software Microlab (Agilent Technologies, Waldbronn, Germany).

### ***3.5.3. Desarrollo de un modelo de clasificación SIMCA para discriminar los tipos de adulteraciones en LGV del valle de pampas.***

#### **3.5.3.1. Evaluación del uso del método SIMCA para la construcción de modelos de clasificación en muestras de leche: con y sin adulteraciones en leche.**

La clasificación relacionada a la aparición de adulteraciones en las muestras de leche, se desarrolló con el algoritmo de modelado independiente suave de analogía de clase (SIMCA). El alcance de SIMCA se basó en el cálculo estadístico para discriminar las muestras de leche con una distancia entre clases (ICD), del cual deriva la medida de la distancia euclidiana en el espacio multivariado, que describe la distancia de los grupos entre sí. Las separaciones de clase entre grupos mayores a 3 se consideran significativas para reconocimiento de puntos de datos

como parte de un grupo. Asimismo, se determinó la confiabilidad del modelo de clasificación de grupos mediante el uso de un enfoque de validación cruzada mediante el cual cada una de las muestras se extrae del modelo y luego se pronostica en base a las muestras restantes en el conjunto de entrenamiento (conjunto de datos cuya cantidad de grupo son conocidos y característico de la población en análisis).

### **3.5.3.2. Identificación y verificación de los grupos funcionales responsables de la discriminación SIMCA con el tipo de muestra y equipo seleccionado, simulando adulteraciones artificiales en concentraciones conocidas.**

Se simuló las condiciones experimentales de la técnica vibracional que generó el mayor poder de discriminación SIMCA entre las muestras, para realizar una adulteración simulada en las muestras de leche con almidón, leche en polvo, suero y agua en concentraciones de (0,3; 0,2 ;1 y 3) % respectivamente. Un total de 10 muestras de leche sin adulterar fueron añadidos (10uL) y analizados en el ATR del equipo MIR. Por otro lado, las muestras de leche adulterada (10 - 15 muestras) fueron evaluados directamente en el equipo MIR. Todas las muestras se analizaron por duplicadas. Al final se empleó el análisis SIMCA para constatar y confirmar la información vinculado a la discriminación entre las clases estudiadas.

### **3.6. Análisis estadístico**

El análisis se basó en clasificar las muestras de leche con relación a la aparición de los adulterantes, por lo que se empleó el método de SIMCA, este empezó con evaluar el análisis de componentes principales (PCA) en cada grupo de manera individual, continuando con la identificación de los factores o PC significativos en cada tipo. Esta técnica fue posible a partir de la fabricación de una matriz rectangular  $m \times n$  para cada clase  $k$ :

$$\text{Matriz para la clase } k: \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde “m” representa la cantidad de muestras de leche y “n” cantidad de variables pertenecientes a las longitudes de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ). Esta matriz de datos es transformada en una nueva matriz de p factores para cada clase k. El modelo estadístico se establece en la ecuación 01:

$$Y_{ik} = \sum T_{ikp} L_{jkp} + R_{ijk} \quad \dots \text{Ecuación 01}$$

Donde:

$y_{ik}$ : Muestra de leche  $i$  en la clase  $k$

$T_{ikp}$ : Score de la muestra de leche  $i$  con la clase  $k$  en el factor  $p$

$L_{jkp}$ : Loading de la variable  $j$  en el factor  $p$  de la clase  $k$

$R_{ijk}$ : Residual de la muestra  $i$  en la variable  $j$  de la clase  $k$

$k$ : clase de adulteración en leche ( $k=1$ , leche,  $k=2$ , leche + suero,  $k=3$  leche + agua,  $k=4$  leche + leche en polvo,  $k=5$  leche + almidón).

$i$ : muestras de leche ( $i=1, 2, 3, \dots$ )

$j$ : Variable de número de onda ( $j=1, 2, 3, \dots$ )

$p$ : número de factores significativos en la clase  $k$  ( $p=1, 2, 3, \dots$ )

Todas las muestras se midieron por duplicado y se utilizó el software quimiométrico Pirouette (v4.0, Infometrix Inc., Woodville, WA, USA), con las opciones de segunda derivada, normalización y afinar los datos espectrales. Asimismo, de acuerdo a los resultados del "Discriminated power" en SIMCA se utilizó la opción de descartar aquellos espectros anómalos que influirán sobre los datos estadísticos de los modelos.

### 3.6.1. Hipótesis estadística (nula y alterna)

- **Hipótesis nula:** Los espectros vibracionales obtenidos mediante espectroscopía infrarroja (FTIR) de la leche pura y de las muestras adulteradas presentan comportamientos estadísticamente similares dentro del espacio multivariado del modelo SIMCA, por lo que no existe una discriminación significativa entre las clases evaluadas.

$$H_0: \mu_{L0} = \mu_{L1} = \mu_{L2} = \mu_{L3} = \mu_{L4}$$

- **Hipótesis alternativa:** Al menos una de las clases de muestra (leche adulterada) difiere significativamente en su estructura espectral respecto a la leche pura ( $L_0$ ), generando una separación estadísticamente significativa entre clases en el modelo SIMCA.

$$H_1: \mu_{L0} \neq \mu_{Lk}$$

- **Análisis quimiométrico:** Software Pirouette® versión 4.0 (Infometrix, Inc.)
- **Nivel de significancia:** ( $ICD > 3$ ).

#### IV. RESULTADOS

##### 4.1.Principales zonas productoras de leche de ganado vacuno del valle de Pampas

A continuación, se muestra el porcentaje de ganaderos en el valle de pampas, Acraquia con 72.72 %, lo que la convierte en zona con mayor producción en leche. Así también los distritos Ahuaycha, Pampas, y Daniel Hernández tienen menor participación, también pueden presentar adulteraciones debido a limitaciones en recursos de control de calidad.

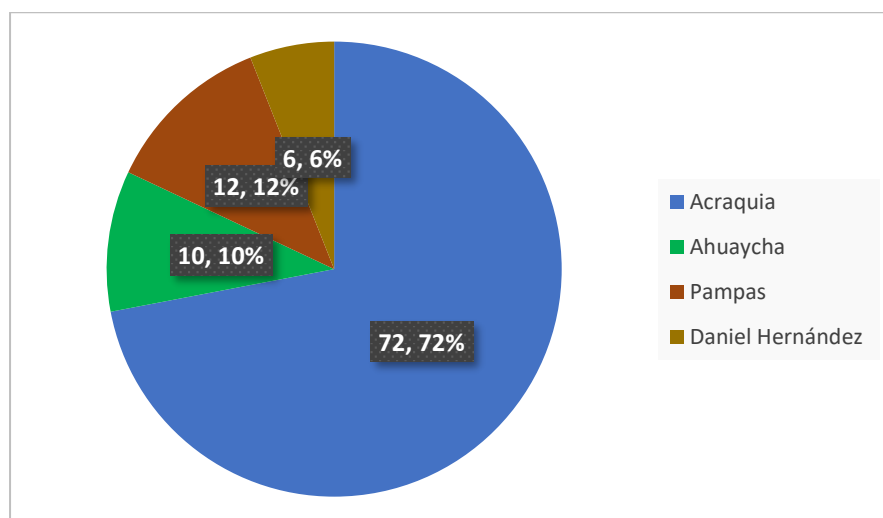
**Tabla 3**

*Zonas productoras del valle de pampas según procedencia.*

Distrito	Localidad	Ganaderos	Raza	Vacunos (N°)
Acraquia	Santa Rosa	72	Brown swins	467
	Purhuay		Holstein	
	Acraquia		Jersey	
Ahuaycha	Yarccacancha	10	Brown swins	38
	Ahuaycha		Holstein	
Pampas	Yacuraquina	12	Brown swins	48
	Pampa Hermosa			
	Chalampampa			
Daniel Hernández	Chilcas	6	Brown swins	31
	Santa María		Holstein	
	Pacamarca		Jersey	
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>-</b>	<b>584</b>

**Figura 1**

Zonas productoras de leche de ganado vacuno del valle de pampas



## 4.2. Identificación de adulteraciones en leche de ganado vacuno

### 4.2.1. Identificación de adulteración en la leche de ganado vacuno

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis sensorial realizado mediante la prueba de comparación pareada, con el objetivo de identificar diferencias perceptibles entre la leche pura y las muestras adulteradas simuladas artificialmente con distintos tipos de sustancias (almidón, leche en polvo, suero y agua) en diversas concentraciones. La evaluación fue realizada por un panel de 30 jueces, quienes determinaron en cada caso la muestra con diferencias sensoriales significativas respecto al control.

**Tabla 4**

*Resultados obtenidos mediante la prueba de comparación pareada.*

N° Jueces	Almidón			Leche polvo			Suero			Agua		
	0.1%	0.3%	0.5%	0.2%	0.4%	0.6%	1%	3%	5%	1%	3%	5%
01			X		X		X				X	
02	X			X			X			X		
03			X		X		X		X		X	
04		X		X			X				X	
05		X		X			X				X	
06			X		X		X				X	
07		X		X			X				X	
08			X	X				X			X	
09		X				X	X				X	
10		X		X			X				X	
11		X		X					X		X	
12			X	X				X			X	
13		X		X				X			X	
14		X				X			X		X	
15		X		X			X				X	
16		X		X			X				X	
17		X			X				X			X
18		X		X					X		X	
19		X		X			X				X	
20		X		X			X				X	
21		X			X		X				X	
22		X		X			X				X	
23	X			X			X				X	
24		X		X			X				X	
25		X				X	X			X		
26		X		X			X				X	
26			X	X			X					
28		X		X			X			X	X	
29		X		X			X				X	
30		X		X			X		X		X	
Total	2	22	6	22	5	3	23	3	6	3	26	1

**Tabla 5***Significancia para pruebas de dos muestras*

Número de juicios	Pruebas bilaterales*			Pruebas unilaterales**		
	Nivel de probabilidad			Nivel de probabilidad		
	5 %	1%	0.1%	5 %	1%	0.1%
<b>5</b>	-	-	-	<b>5</b>	-	-
<b>6</b>	-	-	-	<b>6</b>	-	-
<b>7</b>	7	-	-	<b>7</b>	7	-
<b>8</b>	8	8	-	<b>7</b>	8	-
<b>9</b>	8	9	-	<b>8</b>	9	-
<b>10</b>	9	10	-	<b>9</b>	10	10
<b>11</b>	10	11	11	<b>9</b>	10	11
<b>12</b>	10	11	12	<b>10</b>	11	12
<b>13</b>	11	12	13	<b>10</b>	12	13
<b>14</b>	12	13	14	<b>11</b>	12	13
<b>15</b>	12	13	14	<b>12</b>	13	14
<b>16</b>	13	14	15	<b>12</b>	14	15
<b>17</b>	13	15	16	<b>13</b>	14	16
<b>18</b>	14	15	17	<b>13</b>	15	16
<b>19</b>	15	16	17	<b>14</b>	15	17
<b>20</b>	15	17	18	<b>15</b>	16	18
<b>21</b>	16	17	19	<b>15</b>	17	18
<b>22</b>	17	18	19	<b>16</b>	17	19
<b>23</b>	17	19	20	<b>16</b>	18	20
<b>24</b>	18	19	21	<b>17</b>	19	20
<b>25</b>	18	20	21	<b>18</b>	19	21
<b>26</b>	19	20	22	<b>18</b>	20	22
<b>27</b>	20	21	23	<b>19</b>	20	22
<b>28</b>	20	22	23	<b>19</b>	21	23
<b>29</b>	21	22	24	<b>20</b>	22	24
<b>30</b>	21	23	25	<b>20</b>	22	24
<b>31</b>	22	24	25	<b>21</b>	23	25
<b>32</b>	23	24	26	<b>22</b>	24	26
<b>33</b>	23	25	27	<b>22</b>	24	26
<b>34</b>	24	25	27	<b>23</b>	25	27
<b>35</b>	24	26	28	<b>23</b>	25	27
<b>40</b>	27	29	31	<b>26</b>	28	31
<b>50</b>	33	35	37	<b>32</b>	34	37
<b>60</b>	39	41	44	<b>37</b>	40	43
<b>70</b>	44	47	50	<b>43</b>	46	49

*Nota.* Roessler y col (1956).

\* Número mínimo de juicios coincidentes necesario para establecer diferencia significativa

\*\* Número mínimo de respuestas correctas necesario para establecer diferencia significativa

**Tabla 6**

*Análisis estadístico de la prueba de comparación pareada aplicada a la identificación sensorial de adulteraciones en leche ( $p < 0,05$ ).*

<b>Tipo de adulteración</b>	<b>Concentración (%)</b>	<b>Respuestas (n)</b>	<b>Nivel de significancia (<math>p &lt; 0,05</math>)</b>
Almidón	0,3	22	$p < 0,05$
Leche polvo	0,2	22	$p < 0,05$
Suero	1	23	$p < 0,05$
Agua	3	26	$p < 0,05$

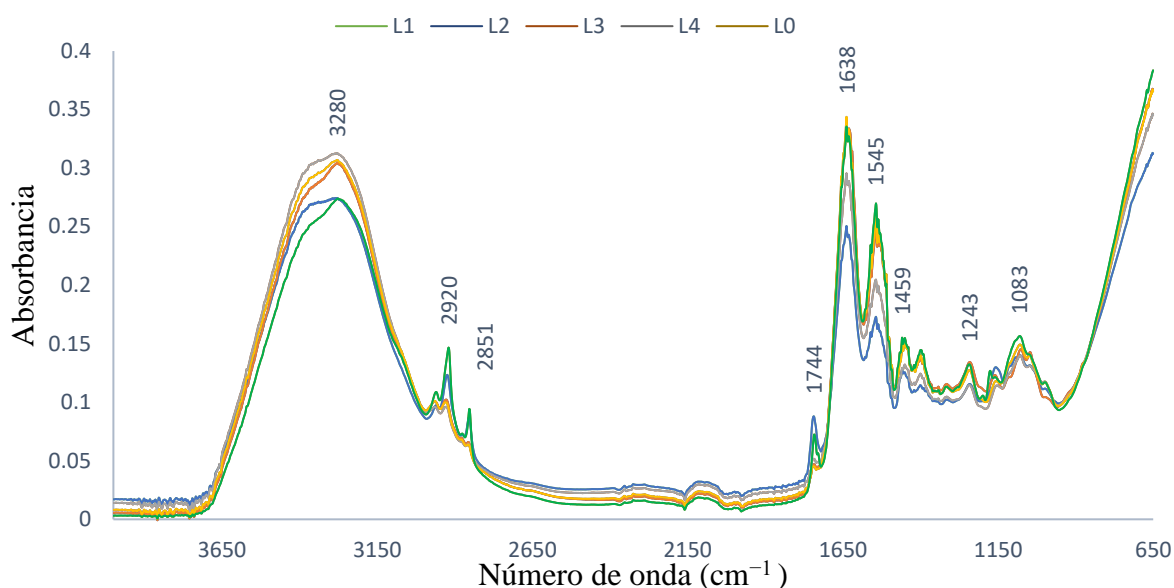
Los resultados evidencian que las adulteraciones con almidón (0,3 %), leche en polvo (0,2 %), suero (1 %) y agua (3 %) presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) frente a la leche control, demostrando una alteración perceptible de las propiedades sensoriales de la matriz láctea. Las diferencias fueron atribuidas principalmente a cambios en la intensidad del sabor, textura y consistencia de las muestras adulteradas. Pero concentraciones inferiores no alcanzaron el umbral de significancia, indicando que el análisis sensorial tiene limitaciones en la detección de adulteraciones a bajos niveles.

#### **4.3.Determinación de perfil vibracional de leche adulterada con espectroscopia MIR**

La Figura 02 muestra los espectros FTIR-MIR de las cinco muestras evaluadas: leche pura (L0) y leche adulterada con agua (L1), almidón (L2), leche en polvo (L3) y suero lácteo (L4). Todos los espectros presentan el perfil característico de la leche en el rango 4000–650  $\text{cm}^{-1}$ , sin embargo, se observan variaciones en la intensidad de bandas específicas asociadas a los efectos de cada adulteración. En las muestras se identificaron las regiones 3280  $\text{cm}^{-1}$  al estiramiento O–H asociado a agua estructurada y lactosa, 2920 y 2851  $\text{cm}^{-1}$  a los estiramientos C–H de lípidos, 1744  $\text{cm}^{-1}$  a la vibración C=O de lípidos (ésteres), 1638 y 1545  $\text{cm}^{-1}$  al Amida I y Amida II asociadas a proteínas, 1459 y 1243  $\text{cm}^{-1}$  a las vibraciones de proteínas y lípidos, por último 1083  $\text{cm}^{-1}$  la región de carbohidratos, principalmente lactosa.

**Figura 2**

Espectro MIR de la leche pura y adulteradas, mediante espectroscopía FTIR (4000 – 650  $\text{cm}^{-1}$ ).

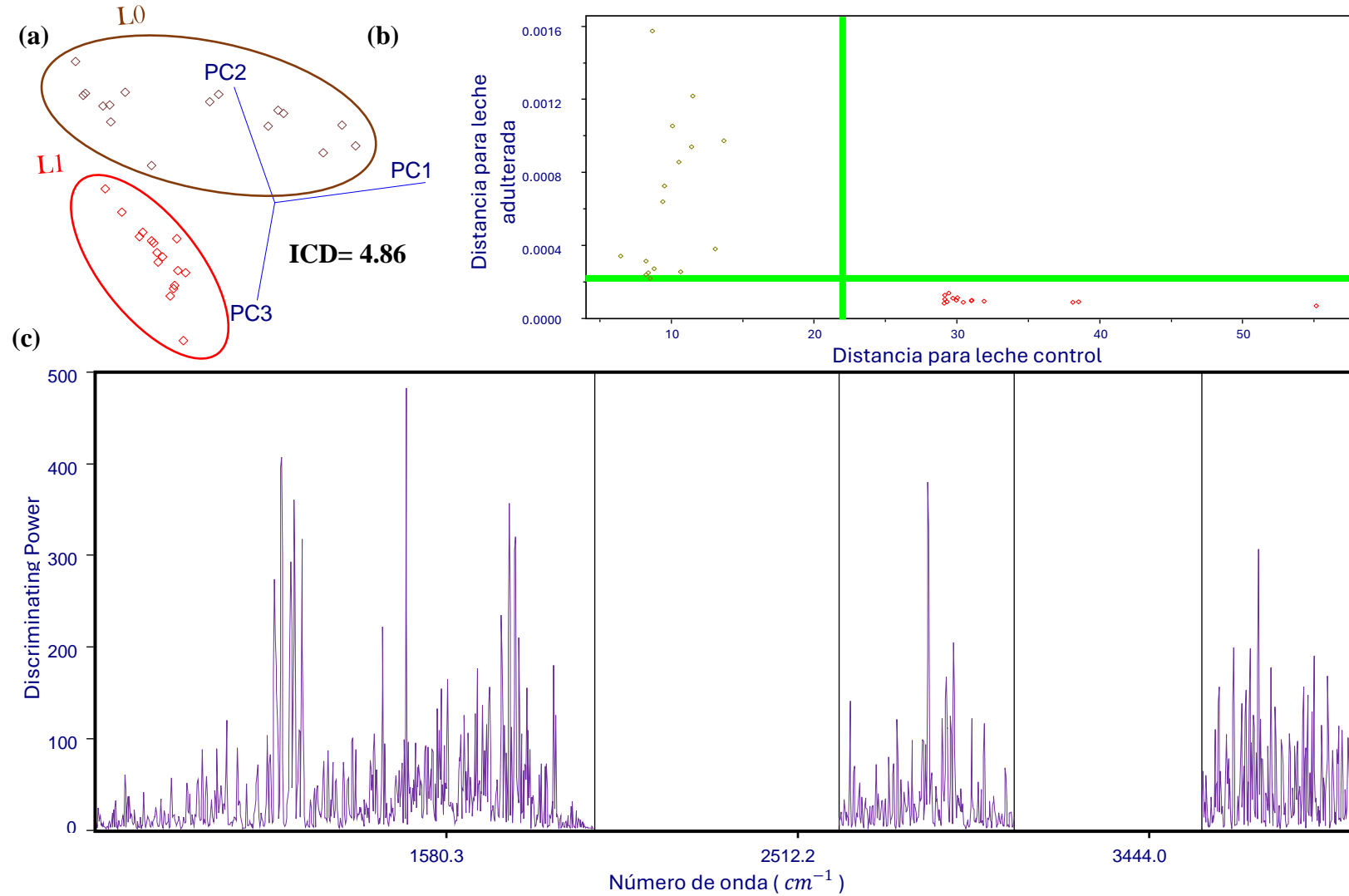


#### 4.4. Desarrollo del modelo de clasificación SIMCA de las adulteraciones de leche

El análisis SIMCA permitió distinguir de manera efectiva la leche pura (L0) de la adulterada (L1, L2, L3, L4), como se evidencia en las figuras 03, 04, 05 y 06. En figuras las clases forman agrupamientos separados a lo largo de PC1, PC2 y PC3 sin coincidir, lo que indica diferencias claras en su perfil espectral. Este comportamiento se confirma en el gráfico Coomans, donde las muestras L0 se mantienen dentro de los límites del modelo de referencia, mientras que las muestras (L1, L2, L3 y L4) exceden el umbral de aceptación, respaldado por un ICD de 4.85, 4.26, 11.1 y 3.15 respectivamente y así demostrando que el modelo reconoce la adulteración como una clase distinta. Finalmente, el gráfico de poder discriminante señala las regiones espectrales que más contribuyen a esta separación, destacando bandas alrededor de 1500–1580  $\text{cm}^{-1}$ , 2257–2512  $\text{cm}^{-1}$  y 3444  $\text{cm}^{-1}$ , asociadas principalmente a proteínas, combinaciones C–H/O–H y grupos O–H.

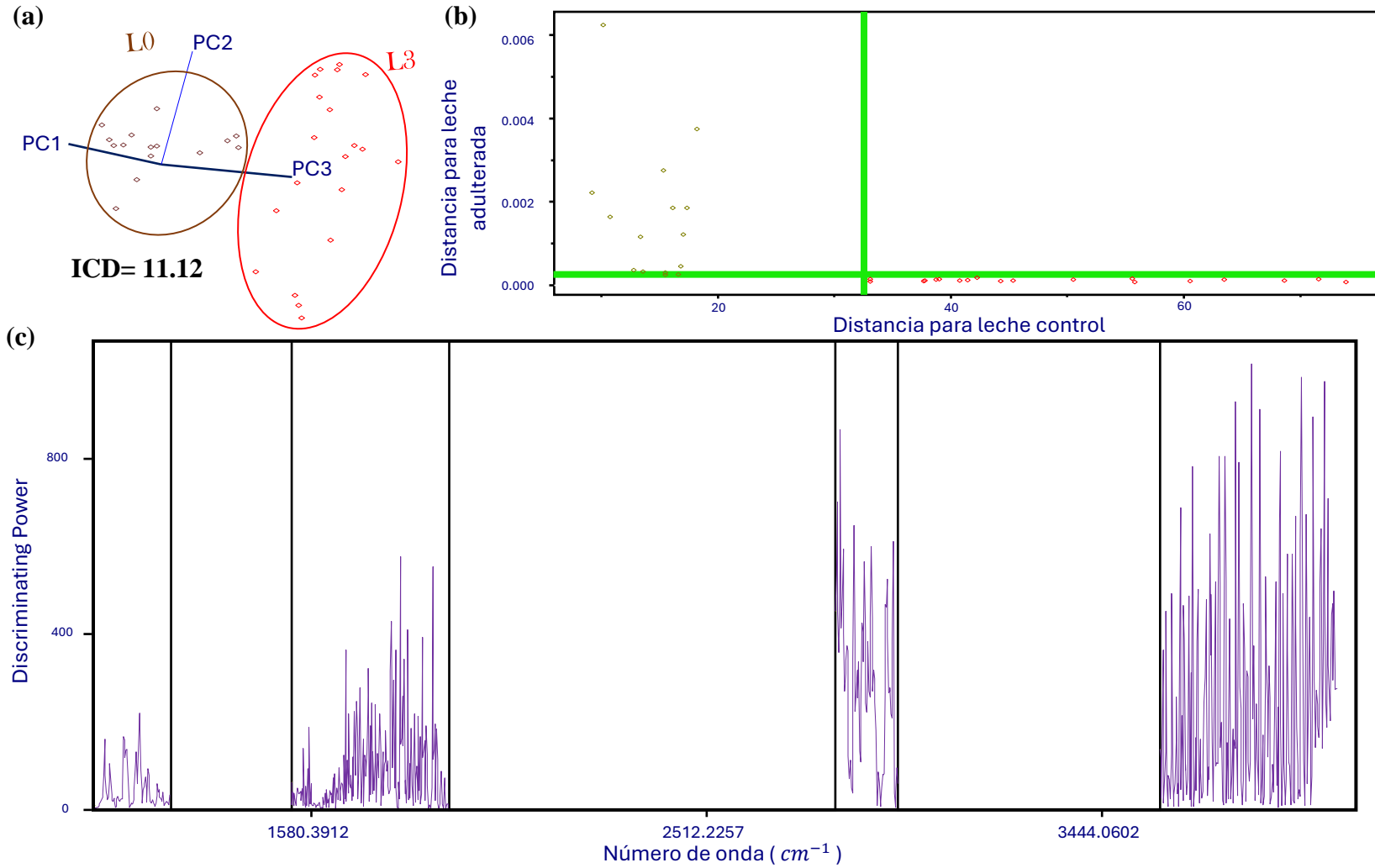
**Figura 3**

Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de agua adquiridos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) Gráfico de Coomans, (c) Poder de discriminación.



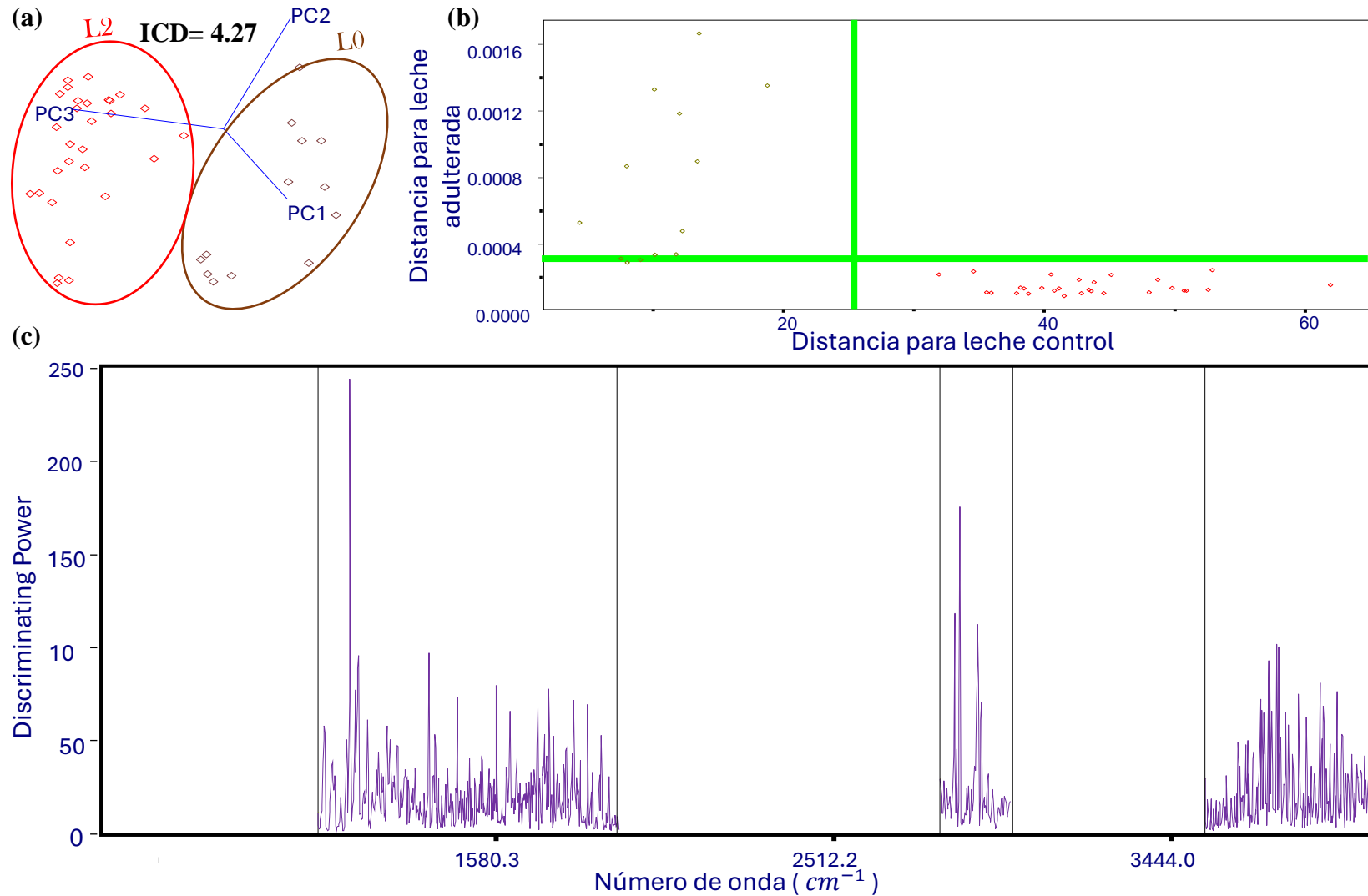
**Figura 4**

Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de leche en polvo adquiridos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) Gráfico de Coomans, (c) Poder de discriminación.



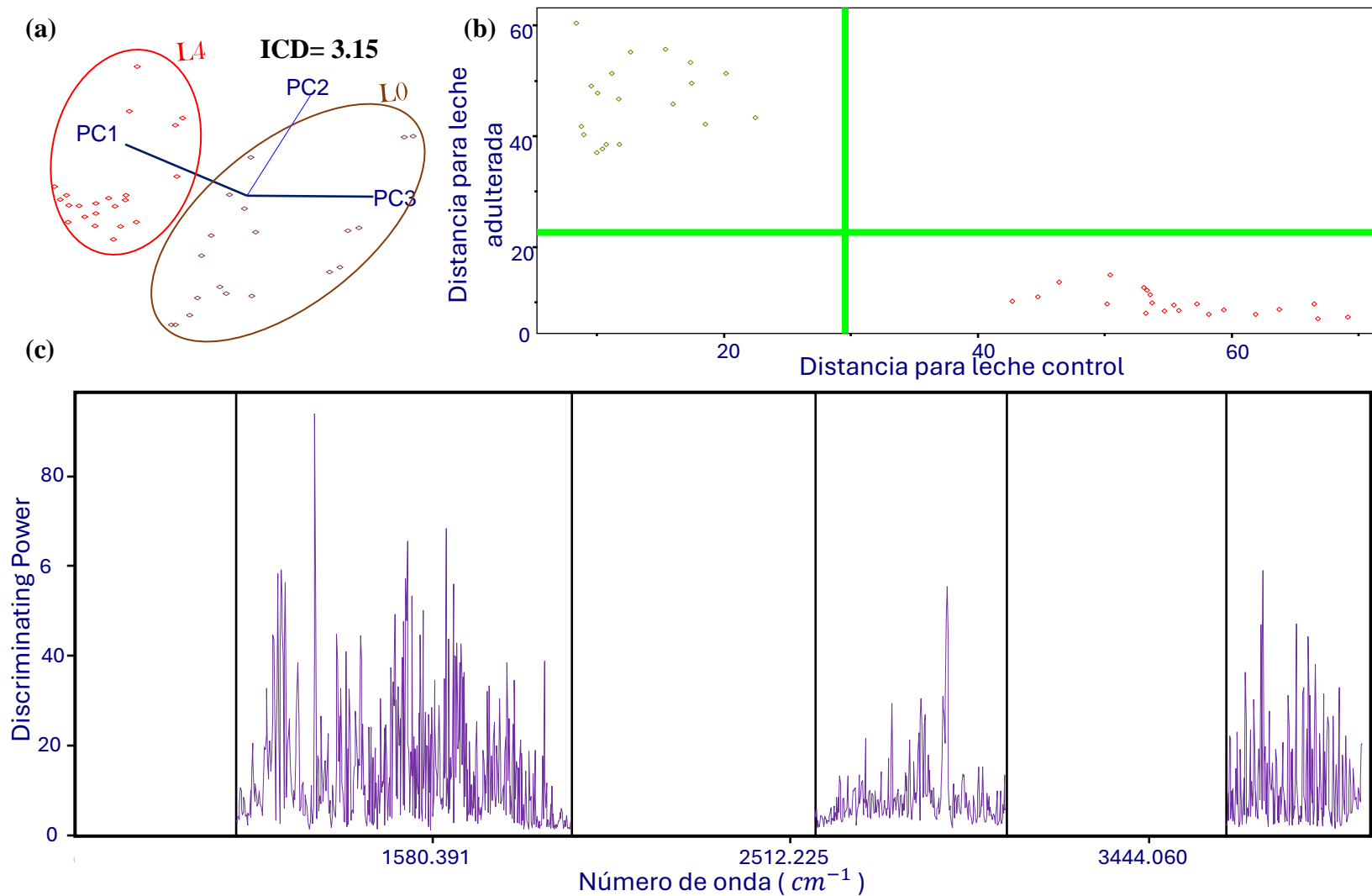
**Figura 5**

Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de almidón adquiridos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) Gráfico de Coomans, (c) Poder de discriminación.



**Figura 6**

Clasificación SIMCA para espectros de leche con y sin adulteración de suero adquiridos en MIR – FTIR 4000. (a) Proyección de clases, (b) Gráfico de Coomans, (c) Poder de discriminación.



## V. DISCUSIÓN

### 5.1. Zonas productoras de leche de ganado vacuno

La figura 1 presentada muestra que Acraquia reúne el 72.72 % de los ganaderos del valle de Pampas, por lo que se consolida como la zona que más leche produce. Este peso productivo coincide con lo que se observa en la Tabla 04, donde Acraquia también registra la mayor cantidad de vacunos (467 animales). En conjunto, estos datos dejan ver que ahí existe un sistema ganadero más armado, tanto en infraestructura como en número de productores. Por otro lado, los distritos de Ahuaycha (10 %), Pampas (12 %) y Daniel Hernández (6 %) aportan mucho menos a la actividad lechera, lo que sugiere que sus sistemas productivos son más pequeños y con posibles limitantes técnicas, económicas o de acceso a servicios.

Estas diferencias no son nuevas; varios estudios ya han descrito este tipo de desigualdad territorial en la producción láctea. Por ejemplo, Hernández M. et al. (2013) explican que los sistemas campesinos varían bastante en tamaño del ganado, recursos y nivel tecnológico, factores que impactan directamente en cuánto producen y en qué tan eficiente es su manejo. De igual manera, Gamboa y Mercado (2015) comenta que los pequeños productores suelen estar más expuestos a la vulnerabilidad y cuentan con menor vinculación comercial, lo cual reduce sus posibilidades de invertir en mejoras. Esto encaja bien con lo que ocurre en Pampas, Ahuaycha y Daniel Hernández.

También es posible que el dominio productivo de Acraquia tenga que ver con cuestiones ambientales y de manejo. En las zonas altoandinas, la disponibilidad de forraje, la forma en que se alimenta al ganado y el nivel de tecnificación hacen una gran diferencia en la productividad (Paucar, 2023; Cáceres, 2015). La alta concentración de ganados en Acraquia podría deberse a mejores condiciones agroecológicas o a prácticas de manejo más consolidadas, lo cual coincide con estudios que muestran que las áreas más tecnificadas logran mejores volúmenes y calidad de leche (Angulo et al., 2022; Pallete. et al., 2023)

Además, en los distritos con menor aporte productivo pueden presentarse más riesgos de adulteración de la leche, ya que suelen tener menos infraestructura para almacenar, refrigerar y controlar la calidad. Esto mismo se ha observado en otros entornos rurales, donde la falta de equipo o capacitación incrementa la posibilidad de alteraciones intencionales o no en la leche fresca (Villanueva et al., 2025; Gamboa y Mercado, 2015). Estas condiciones impactan

directamente en la trazabilidad y autenticidad del producto, un punto clave para métodos como la espectroscopia vibracional, utilizada en esta investigación.

Como podemos observar los resultados muestran una distribución desigual de los productores lecheros en el Valle: Acraquia funciona como el eje productivo, mientras que los demás distritos operan a menor escala y podrían requerir apoyo técnico y programas de fortalecimiento. Estas diferencias territoriales deben tomarse en cuenta al interpretar los perfiles fisicoquímicos y espectrales de la leche, ya que las condiciones de manejo, alimentación y producción influyen en su composición y en su variabilidad bioquímica.

## **5.2. Identificación de adulteraciones en leche**

Los resultados sensoriales obtenidos mediante la prueba de comparación pareada evidenciaron que las adulteraciones con almidón (0,3 %), leche en polvo (0,2 %), suero (1 %) y agua (3 %) generaron diferencias perceptibles respecto al control ( $p < 0,05$ ), lo que confirma que cada adulterante altera la matriz láctea de manera específica y con distinta magnitud sensorial. Esta modificación de los adulterantes puede clasificarse según su mecanismo de acción sensorial; adulterantes que incrementan sólidos, como almidón y leche en polvo, y adulterantes diluyentes, como suero y agua.

En el caso del almidón, la detección sensorial a un nivel tan bajo como 0,3 % es consistente con los hallazgos de Singh y Gandhi, (2015), quienes señalaron que este adulterante incrementa la viscosidad y genera una textura más pastosa, características fácilmente percibidas por el panel humano. Coitinho et al., (2017) también demostraron que el almidón altera significativamente la zona de carbohidratos en la estructura química de la leche, lo cual se traduce en diferencias claras en la sensación en boca, tal como fue observado en este estudio.

La adulteración con leche en polvo (0,2 %) mostró el umbral sensorial más bajo entre los adulterantes evaluados, lo que coincide con los reportes de Azad y Ahmed, (2016), quienes describen que la leche en polvo aumenta la intensidad del sabor lácteo, la densidad y la sensación cremosa debido a la elevación de sólidos totales. (Tunjar, 2024), en su estudio sensorial y espectral, confirmó que pequeñas cantidades de leche en polvo generan incrementos perceptibles en notas lácteas y espesor, lo que explica la alta sensibilidad de tu panel en su identificación.

En comparación, los adulterantes diluyentes, como el suero (1 %) y el agua (3 %), mostraron mayores umbrales de detección. Estos resultados son consistentes con lo documentado por (Ayala y Ayala, 2014 y Viviana et al., 2016), quienes indican que el suero reduce la cremosidad, modifica la concentración de caseínas y genera un perfil sensorial más liviano que solo se vuelve evidente a partir de concentraciones moderadas. (Coitinho et al., 2017) demostraron mediante espectroscopía que el suero altera significativamente la proporción proteína/lactosa, pero dichas diferencias no siempre son intensas en términos organolépticos, lo que explica que el panel humano solo lo detectara a partir del 1 %. En cuanto al agua, adulterante más frecuente a nivel productivo, la literatura coincide en que su impacto sensorial es limitado. (Salih y Yang, 2017 y Tunjar, 2024) señalan que diluciones menores al 2 % no son fácilmente perceptibles para el panel, debido a que el agua no introduce nuevos atributos, sino que disminuye la intensidad del sabor y el cuerpo, cambios que el sistema sensorial humano detecta únicamente cuando superan un umbral perceptivo. Este comportamiento coincide exactamente con tus resultados, donde la adulteración solo fue identificada a partir del 3 %.

Otros artículos también describen adulteraciones químicas más complejas, como melamina, detergentes, formol, sacarosa o urea (Xin y Stone, 2008; Fischer et al., 2011; Singh y Gandhi, 2015) . Estos adulterantes no fueron evaluados en este estudio, pero la literatura indica que provocan cambios físico-químicos significativos sin necesariamente alterar atributos sensoriales, reforzando que la ausencia de percepciones sensoriales no implica ausencia de adulteración. Esto enfatiza un punto crítico confirmado en esta investigación: el análisis sensorial es útil para adulteraciones que modifican la textura y el cuerpo, pero no para adulteraciones químicas o diluciones leves, lo que coincide con las conclusiones de (Coitinho et al., 2017 y Tunjar, 2024), quienes recomiendan el uso de métodos instrumentales para detectar adulteraciones de baja concentración.

Los resultados del análisis sensorial mostraron que adulterar la leche sí provoca cambios perceptibles, así como sustancias que aumentan los sólidos totales, el almidón o la leche en polvo y pudieron detectarse incluso a concentraciones muy bajas, ya que modifican de manera directa la textura y el cuerpo del producto. En cambio, adulterantes que diluyen la leche, como el suero o el agua, necesitaron estar presentes en mayores proporciones para superar el umbral mínimo perceptible sensorialmente. Estos resultados coinciden con lo que se ha reportado en la literatura y confirman que, aunque la evaluación sensorial es útil para

identificar cambios evidentes en la leche, tiene limitaciones cuando se trata de adulteraciones en bajas concentraciones. Por ello, es necesario complementarla con técnicas instrumentales más sensibles, como el análisis químico mediante FTIR y métodos quimiométricos.

### **5.3. Perfil vibracional de leche adulterada con espectroscopia MIR**

La Figura 02 presenta los espectros FTIR-MIR de la leche pura (L0) y de las muestras adulteradas con agua (L1), leche en polvo (L2), almidón (L3) y suero lácteo (L4). En todos los casos se aprecia el perfil MIR característico de la leche dentro del rango de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ . Sin embargo, la presencia de adulterantes provocó variaciones claras en la intensidad de bandas específicas, lo que refleja cambios en la composición fisicoquímica del sistema. El espectro de la leche pura mostró las bandas típicas asociadas a vibraciones O–H, C–H y C=O, así como las regiones propias de proteínas, carbohidratos y lípidos, coincidiendo con lo reportado por (Jaiswal et al., 2017, Conceição et al., 2019 y Motolinia et al., 2016), quienes también observaron la reproducibilidad de este perfil en matrices lácteas.

En las muestras adulteradas con agua se detectó una disminución general en la absorbancia a lo largo del espectro, particularmente en las bandas relacionadas con lípidos y proteínas. Esto se debe al efecto diluyente del agua, que reduce la concentración relativa de los componentes orgánicos. La disminución fue especialmente notoria en 2920 y 2851  $\text{cm}^{-1}$  (estiramientos  $\text{CH}_2$ ) y en regiones proteicas como 1638, 1545 y 1459  $\text{cm}^{-1}$ . Estos resultados coinciden con lo señalado por (Tunjar, 2024), quien mostró que incluso pequeñas cantidades de agua pueden modificar el espectro debido a la alta sensibilidad del FTIR a los cambios en el contenido de sólidos. Además, la intensificación de la banda alrededor de 3280  $\text{cm}^{-1}$  confirma el incremento proporcional de agua en la muestra, tal y como lo reportaron (Bahadi et al., 2021) al analizar variaciones en el contenido hídrico de leche sometida a diferentes condiciones de manejo.

Para la leche adulterada con leche en polvo, se observó un aumento en la intensidad de las bandas asociadas a grupos carbonilo y metileno, lo cual indica una mayor concentración de sólidos, en particular de lactosa, proteínas y grasas. El aumento registrado en 1744  $\text{cm}^{-1}$  (C=O) y el incremento en 2920 y 2851  $\text{cm}^{-1}$  concuerdan con la mayor proporción de triglicéridos y carbohidratos presentes en la leche reconstituida. Este comportamiento coincide con los resultados de (Tunjar, 2024), quien documentó patrones similares al incrementar la cantidad de leche en polvo en muestras lácteas. De igual forma, (Huaman, 2023) reportaron que las

bandas entre 1745 y 1000  $\text{cm}^{-1}$  se intensifican conforme aumenta la proteína y la lactosa, lo cual coincide plenamente con las diferencias detectadas entre L0 y L2 en este estudio.

En el caso de la adulteración con almidón, los cambios más evidentes se presentaron entre 1200 y 900  $\text{cm}^{-1}$ , región donde se ubican vibraciones propias de polisacáridos complejos. Se registró un incremento alrededor de 1083  $\text{cm}^{-1}$ , asociado a vibraciones C–O y C–C del almidón. Este comportamiento coincide con lo descrito por (Conceição et al., 2019), quienes identificaron esta zona como especialmente sensible a la incorporación de almidón y sacarosa, tanto por su similitud estructural con la lactosa como por el aporte adicional de grupos hidroxilo. El aumento en estas bandas, junto con una ligera disminución en las bandas lipídicas, sugiere que el almidón no solo incrementa los carbohidratos totales, sino que también modifica la proporción relativa de solutos, reduciendo la expresión espectral de los lípidos. Algo similar fue observado por (Jaiswal et al., 2017) en adulteraciones no lipídicas.

En cuanto a la adulteración con suero lácteo, las bandas asociadas a proteínas séricas y lactosa mostraron un aumento notable. Las señales alrededor de 1638 y 1545  $\text{cm}^{-1}$  correspondientes a Amida I y Amida II reflejaron la mayor presencia de proteínas del suero, especialmente  $\beta$ -lactoglobulina, cuyas absorciones aparecen justamente en ese rango. Esto coincide con lo reportado por Motolinia et al., (2016) al analizar el efecto térmico sobre agregados proteicos. Asimismo, el incremento en la zona de 1083  $\text{cm}^{-1}$  sugiere un aumento en la contribución de lactosa, coherente con la composición del suero. Este comportamiento coincide también con lo observado por Conceição et al., (2019), quienes reportaron incrementos en esta región al adulterar leche con urea, sacarosa o suero, ya que ahí se ubican modos vibracionales sensibles a carbohidratos reductores.

Al comparar estos resultados con estudios orientados a autenticación molecular, como los de (Arifah et al., 2022 ; Ravinder et al., 2021), se aprecia un comportamiento similar en la discriminación entre muestras, especialmente en cómo las regiones 3000–2800  $\text{cm}^{-1}$  y 1700–1500  $\text{cm}^{-1}$  reflejan variaciones en el balance entre grasas y proteínas. Estos trabajos confirman que incluso cambios pequeños en la composición generan diferencias detectables, lo cual también se ve en la clara separación espectral entre la leche pura y las muestras adulteradas evaluadas aquí. Estos resultados indican que la espectroscopía FTIR-MIR es altamente sensible a los cambios que provocan adulterantes comunes como agua, almidón, leche en polvo y suero. Las variaciones en las bandas correspondientes a lípidos, proteínas y carbohidratos coinciden

con la evidencia disponible en la literatura y muestran que cada adulterante deja una huella espectral particular, facilitando su identificación.

#### **5.4. Modelo de clasificación SIMCA**

Los resultados obtenidos con la espectroscopía FTIR-MIR, junto con el análisis SIMCA, mostraron una diferenciación clara y consistente entre leche pura y leche adulterada (agua, almidón, leche en polvo y suero) como se muestra en las figuras 3, 4, 5 y 6. Esto se reflejó tanto en los gráficos de proyecciones de clases y Coomans como en los valores ICD registrados (4.85, 4.26, 11.1 y 3.15). Dicho comportamiento coincide con lo que ya se ha documentado en la literatura sobre adulteración láctea mediante técnicas vibracionales. Por ejemplo, (Perez et al., 2024) demostraron que incluso sensores potenciométricos pueden distinguir adulterantes comunes, lo cual va en línea con la sensibilidad espectral observada en este estudio. Asimismo, (Jawaid et al., 2013b) reportaron que la espectroscopía FTIR SB-ATR permite detectar melamina en concentraciones muy bajas, mostrando que pequeñas perturbaciones químicas generan firmas espectrales suficientes para ser identificadas, tal como ocurrió aquí con las adulteraciones con agua, suero y almidón.

Desde el enfoque quimiométrico, los modelos SIMCA lograron clasificar correctamente las muestras adulteradas. Esto coincide con lo señalado por (Kasemsumran et al., 2007 ; Musa y Yang, 2021), quienes demostraron que las tecnologías vibracionales combinadas con SIMCA y DD-SIMCA son capaces de identificar adulteraciones con agua, proteínas vegetales, sales e incluso leche de otras especies. En conjunto, estos resultados muestran que los modelos de una sola clase funcionan bien en matrices lácteas, donde pequeñas variaciones en la composición producen patrones espectrales característicos.

Las discriminaciones observadas se explican por cambios definidos en regiones MIR específicas. Las bandas de 1500–1580  $\text{cm}^{-1}$ , relacionadas con vibraciones proteicas (Amida II), concuerdan con lo descrito por (Carbonaro y Nucara, 2009). También se observaron modificaciones en la región 2257–2512  $\text{cm}^{-1}$ , asociada a combinaciones C–H/O–H, y alrededor de 3444  $\text{cm}^{-1}$ , correspondiente a estiramientos O–H; ambas reflejan variaciones en humedad y carbohidratos, tal como reportaron (Gondim et al., 2017 ; Balan et al., 2020b). Esto ayuda a explicar los cambios producidos por los adulterantes evaluados: el agua incrementa la señal O–H, el suero altera la relación proteína/lactosa, el almidón aumenta las bandas carbohidratadas (900–1200  $\text{cm}^{-1}$ ) y la leche en polvo eleva la intensidad de las señales proteicas y lipídicas.

El estudio de (Tunjar, 2024c) resulto particularmente relevante porque analizó adulterantes similares utilizando espectroscopía NIR/MIR para identificar agua, soya y leche en polvo en leche fresca. Encontró que agregar agua disminuye de forma sistemática las bandas asociadas a lactosa y proteínas, a la vez que incrementa las señales O–H, lo cual coincide plenamente con lo observado en este trabajo en la región 3200–3600  $\text{cm}^{-1}$ . También reportó que la leche en polvo aumenta la absorbancia en bandas proteicas y carbohidratadas, tal como ocurrió en nuestras muestras L2, donde se incrementaron las señales de Amida I/II y el rango 1000–1200  $\text{cm}^{-1}$ . Aunque Tunjar analizó soya y no almidón, su descripción de la respuesta espectral de proteínas vegetales muestra similitudes con la adulteración con almidón, ya que ambas introducen señales adicionales en la región 900–1200  $\text{cm}^{-1}$  asociadas a polisacáridos. Esto coincide con lo señalado por (Maraboli et al., 2002), quienes demostraron que los aislados proteicos vegetales presentan patrones vibracionales comparables a los de carbohidratos complejos. Estas correspondencias refuerzan la capacidad del FTIR para detectar tanto adulterantes vegetales como polisacáridicos, como quedó claro en las muestras adulteradas con almidón (L3). La alta capacidad de Tunjar para discriminar adulteraciones, con valores de  $R^2$  superiores a 0.999, también se refleja en la eficiencia clasificatoria del modelo SIMCA desarrollado en este estudio. La coincidencia entre ambos trabajos realizados usando leche fresca confirma la viabilidad del infrarrojo para aplicaciones rutinarias en la industria láctea.

Estudios realizados en leche de distintas especies (Chen et al., 2004; Gonçalves et al., 2020) han mostrado que el MIR detecta variaciones composicionales muy sutiles, lo que ayuda a explicar la sensibilidad con la que se diferenciaron el suero y la leche en polvo en este trabajo. Además, investigaciones como las de (Careda et al., 2016 y Salleh et al., 2019) confirman que el MIR puede identificar con gran precisión cambios en grasa, proteína y lactosa, parámetros que se ven directamente afectados por los adulterantes evaluados aquí.

Finalmente, (Santos et al., 2013) señalaron que equipos portátiles MIR pueden superar a NIR en capacidad discriminante debido a su mayor resolución espectral. Esto se reflejó en la separación clara lograda con los modelos SIMCA de este estudio. En conjunto, toda la literatura consultada respalda los resultados obtenidos, confirmando que FTIR-MIR combinado con SIMCA es un método robusto, sensible y confiable para detectar adulteraciones en leche, con potencial inmediato para su uso en laboratorios de control de calidad.

## VI. CONCLUSIONES

- Se diseñó una metodología confiable para detectar leche de vaca adulterada mediante la espectroscopía vibracional FTIR con el modelo quimiométrico SIMCA. Con esta combinación fue posible distinguir con precisión la leche pura de la leche adulterada (agua, suero, almidón y leche en polvo), obteniendo valores ICD mayores a 3 en todas las clases. Estos resultados confirman que la integración FTIR–SIMCA es una herramienta sólida, rápida y no destructiva para verificar la autenticidad y calidad de la leche producida en el Valle de Pampas.
- Se observó que Acraquia concentra el 72.72 % de los ganaderos y también el mayor número de vacunos (467 animales), por lo que se consolida como la zona que más aporta a la producción lechera del valle. Así también, Ahuaycha, Pampas y Daniel Hernández muestran una producción más limitada. Esta diferencia deja ver una estructura ganadera bastante desigual, lo cual influye tanto en la variación de la composición de la leche como en la susceptibilidad a distintos tipos de adulteración.
- En cuanto a los fraudes más comunes, se identificó principalmente la adición de agua, suero, almidón y leche en polvo. Estas adulteraciones pudieron detectarse sensorialmente a partir de umbrales mínimos de percepción: agua (3 %), suero (1 %), almidón (0.3 %) y leche en polvo (0.2 %). Esto confirma que estas prácticas modifican la matriz láctea y representan los engaños más frecuentes en los sistemas de producción primaria del valle.
- El análisis de los espectros FTIR mostró cambios marcados en regiones como  $3280\text{ cm}^{-1}$  (O–H),  $2920\text{--}2851\text{ cm}^{-1}$  (C–H),  $1744\text{ cm}^{-1}$  (C=O),  $1638\text{--}1545\text{ cm}^{-1}$  (Amida I–II) y  $1083\text{ cm}^{-1}$  (carbohidratos). Gracias a estas variaciones fue posible identificar la huella espectral específica de cada adulterante, demostrando que la espectroscopía MIR es muy sensible para detectar alteraciones en la composición incluso cuando están presentes en proporciones bajas.
- Finalmente, el modelo SIMCA construido con los espectros MIR logró distinguir con alta precisión la leche pura de las adulteradas, con valores ICD mayores a 3 (agua 4.85; leche en polvo 4.26; almidón 11.1; suero 3.15). Esto confirma que el modelo ofrece una capacidad estadística sólida para clasificar y autenticar las muestras de leche producidas en el Valle de Pampas.

## VII. RECOMENDACIONES

- Realizar una validación del modelo de clasificación utilizando muestras en centros de acopio, mercados, pequeños productores y otros. Con el fin de evaluar el desempeño en condiciones reales de variabilidad y asegurar la aplicación operativa en el Valle de Pampas.
- Aplicar la metodología FTIR para detectar compuestos claves en la leche de ganado vacuno, como antibióticos y residuos pesticidas, agentes neutralizantes y adulterantes químicos, fortaleciendo la inocuidad de la leche producida en la región de Huancavelica.
- Aplicar la metodología FTIR para cuantificar compuestos esenciales de la leche y derivados lácteos como proteínas, carbohidratos, grasas, lactosas, sólidos no grasos, y otros de interés, para generar modelos predictivos que permitan la estimación más rápida y precisa que los métodos convencionales existentes.
- Incorporar equipos portátiles FTIR en actividades de supervisión y fiscalización, esto permitirá un control en tiempo real en el campo para la detección rápida de adulterantes sin necesidad de trasladar muestras a laboratorios especializados.
- Desarrollar modelos quimiométricos adicionales como (PLS-DA, PCA, SVM o Redes Neuronales) para complementar y comparar el desempeño del modelo SIMCA, esto con el objetivo de mejorar el análisis y capacidad de clasificación con sistemas multivariados.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abete Pérez, L. (2025). *Estrategias no invasivas y “on-site” basadas en la espectroscopía infrarroja para el control de fraudes en leche* [Universidad de Oviedo]. <https://hdl.handle.net/10651/79943>
- Agudelo Gómez, D. A., & Bedoya Mejía, O. (2005). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 38–42. <https://hdl.handle.net/10495/31684>
- Angulo-Arizala, J., Nemocón-Cobos, A. M., Posada-Ochoa, S. L., Mahecha-Ledesma, L., Angulo-Arizala, J., Nemocón-Cobos, A. M., Posada-Ochoa, S. L., & Mahecha-Ledesma, I. (2022). Producción, calidad de leche y análisis económico de vacas holstein suplementadas con ensilaje de botón de oro (*Tithonia diversifolia*) o ensilaje de maíz. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(1), 27–40. <https://doi.org/10.18684/BSAA.V20.N1.2022.1535>
- Arifah, M. F., Irnawati, Ruslin, Nisa, K., Windarsih, A., & Rohman, A. (2022). The Application of FTIR Spectroscopy and Chemometrics for the Authentication Analysis of Horse Milk. *International Journal of Food Science*, 2022(1), 7643959. <https://doi.org/10.1155/2022/7643959>
- Ayala, M. A., & Ayala, A. (n.d.). *Evaluación de la presencia de suero láctico como adulterante en la calidad de leche cruda*. Retrieved December 2, 2025, from <https://ciencia.lasalle.edu.co/zootecniaM>.
- Azad, T., & Ahmed, S. (2016). Common milk adulteration and their detection techniques. *International Journal of Food Contamination 2016 3:1*, 3(1), 22-. <https://doi.org/10.1186/S40550-016-0045-3>
- Bahadi, M., Ismail, A. A., & Vasseur, E. (2021). Fourier Transform Infrared Spectroscopy as a Tool to Study Milk Composition Changes in Dairy Cows Attributed to Housing Modifications to Improve Animal Welfare. *Foods*, 10(2), 450. <https://doi.org/10.3390/FOODS10020450>
- Balan, B., Dhaulaniya, A. S., Jamwal, R., Yadav, A., Kelly, S., Cannavan, A., & Singh, D. K. (2020a). Rapid detection and quantification of sucrose adulteration in cow milk using Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy coupled with

- multivariate analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 240, 118628. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2020.118628>
- Balan, B., Dhaulaniya, A. S., Jamwal, R., Yadav, A., Kelly, S., Cannavan, A., & Singh, D. K. (2020b). Rapid detection and quantification of sucrose adulteration in cow milk using Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy coupled with multivariate analysis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 240, 118628. <https://doi.org/10.1016/J.SAA.2020.118628>
- Bonett Jiménez, J. P. (2013). *Uso de la espectroscopía de reflectancia difusa (MIR) para la determinación de las propiedades químicas en suelos agrícolas de Colombia* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51527>
- Brereton, R. G. (2007). Applied Chemometrics for Scientists. In *Applied Chemometrics for Scientists*. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470057780;PAGEGROUP:STRING:PUBLICATION>
- Bro, R., & Smilde, A. K. (2014). Principal component analysis. *Analytical Methods*, 6(9), 2812–2831. <https://doi.org/10.1039/C3AY41907J>
- Burns, D. A., & Ciurczak, E. W. (2007). Handbook of Near-Infrared Analysis. In *Handbook of Near-Infrared Analysis* (3rd Edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420007374/HANDBOOK-NEAR-INFRARED-ANALYSIS-DONALD-BURNS-EMIL-CIURCZAK>
- Cáceres Cabanillas, R. A. (2015). *Manejo de la producción lechera en dos sistemas de utilización de pasturas en la sierra central*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2128>
- Calderón -Rangel, A., Rodríguez-, V. C., & Martínez-H, N. (2013). Determinación de adulterantes en leches crudas acopiadas en procesadoras de quesos en Montería (Córdoba). *ORINOQUIA*, 17(2), 202–206. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-37092013000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092013000200007&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Calvano, C. D., De Ceglie, C., D'Accolti, L., & Zambonin, C. G. (2012). MALDI-TOF mass spectrometry detection of extra-virgin olive oil adulteration with hazelnut oil by analysis

- of phospholipids using an ionic liquid as matrix and extraction solvent. *Food Chemistry*, 134(2), 1192–1198. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.02.154>
- Carbonaro, M., & Nucara, A. (2009). Secondary structure of food proteins by Fourier transform spectroscopy in the mid-infrared region. *Amino Acids* 2009 38:3, 38(3), 679–690. <https://doi.org/10.1007/S00726-009-0274-3>
- Caredda, M., Addis, M., Ibba, I., Leardi, R., Scintu, M. F., Piredda, G., & Sanna, G. (2016). Prediction of fatty acid content in sheep milk by Mid-Infrared spectrometry with a selection of wavelengths by Genetic Algorithms. *LWT*, 65, 503–510. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2015.08.048>
- Carrasco Flores, E. A. (2004). *Espectroscopía vibracional infrarrojo y Raman amplificadas por superficie (Seira y Sers) aplicada a la detección de trazas de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y sus nitroderivados (NPAHs)* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192168>
- Casale, M., & Simonetti, R. (2014). Review: Near Infrared Spectroscopy for Analysing Olive Oils. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Vol. 22, Issue 2, Pp. 59-80, 22(2), 59–80. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=jnirs-22-2-59>
- Chávez Vela, N. A. (2008). *Detección de adulteración de leche con suero de quesería por medio de un sistema tipo Elisa* [Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/748>
- Chen, R. K., Chang, L. W., Chung, Y. Y., Lee, M. H., & Ling, Y. C. (2004a). Quantification of cow milk adulteration in goat milk using high-performance liquid chromatography with electrospray ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 18(10), 1167–1171. <https://doi.org/10.1002/RCM.1460;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:10970231;WGROUP:STRING:PUBLICATION>
- Chen, R. K., Chang, L. W., Chung, Y. Y., Lee, M. H., & Ling, Y. C. (2004b). Quantification of cow milk adulteration in goat milk using high-performance liquid chromatography with electrospray ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 18(10), 1167–1171. <https://doi.org/10.1002/RCM.1460;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:10970231;WGROUP:STRING:PUBLICATION>

- Coitinho, T. B., Cassoli, L. D., Cerqueira, P. H. R., da Silva, H. K., Coitinho, J. B., & Machado, P. F. (2017). Adulteration identification in raw milk using Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, *54*(8), 2394. <https://doi.org/10.1007/S13197-017-2680-Y>
- Colak, S., Uzunsoy, I., Narin, A., & Duran, U. (2025). Adulteration detection of cow milk in buffalo milk using Fourier-transform infrared spectroscopy and artificial intelligence-based techniques. *Journal of Food Composition and Analysis*, *140*, 107203. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2025.107203>
- Conceição, D. G., Gonçalves, B. H. R. F., da Hora, F. F., Faleiro, A. S., Santos, L. S., & Ferrão, S. P. B. (2019). Use of FTIR-ATR Spectroscopy Combined with Multivariate Analysis as a Screening Tool to Identify Adulterants in Raw Milk. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, *30*(4), 780–785. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180208>
- Condori Huamán, V. (2020). Detección de residuos de antibióticos y la calidad de la leche fresca comercializada en la ciudad del Cusco [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. In *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/5069>
- Cozzolino, D., Segura-Carretero, A., & Arrá Ez-Romá, D. (2015). Infrared Spectroscopy as a Versatile Analytical Tool for the Quantitative Determination of Antioxidants in Agricultural Products, Foods and Plants. *Antioxidants 2015, Vol. 4, Pages 482-497*, *4*(3), 482–497. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX4030482>
- Du, L. (2024). New insights into raw milk adulterated with milk powder identification: ATR-FTIR spectroscopic fingerprints combined with machine learning and feature selection approaches. *Journal of Food Composition and Analysis*, *133*, 106443. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2024.106443>
- Fischer, W. J., Schilter, B., Tritscher, A. M., & Stadler, R. H. (2011). CONTAMINANTS OF MILK AND DAIRY PRODUCTS | Contamination Resulting from Farm and Dairy Practices. *Encyclopedia of Dairy Sciences: Second Edition*, 887–897. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00104-7>
- Freitas Filoda, P., Flores Fetter, L., Fornasier, F., Schneider, R. de C. de S., Helfer, G. A., Tischer, B., Teichmann, A., & Ben da Costa, A. (2018). Fast Methodology for Identification of Olive Oil Adulterated with a Mix of Different Vegetable Oils. *Food*

- Analytical Methods* 2018 12:1, 12(1), 293–304. <https://doi.org/10.1007/S12161-018-1360-5>
- Gamboa, C., & Mercado, W. (2015). Comercialización de la leche en la Provincia de Concepción, Valle del Mantaro, Junín - Perú. *Anales Científicos*, 76(2), ág. 225-2. <https://doi.org/10.21704/AC.V76I2.785>
- García Montiel, R. (2015). *Espectrometría infrarroja media (MIR) y reconocimiento de pautas para la diferenciación de tequilas* [Universidad Nacional Autónoma de Mexico]. <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2015/diciembre/0739235/0739235.pdf>
- Gonçalves, B. H. R. F., Silva, G. J., de Jesus, J. C., Conceição, D. G., Santos, L. S., & Ferrão, S. P. B. (2020). Fast Verification of Buffalo's Milk Authenticity by Mid-Infrared Spectroscopy, Analytical Measurements and Multivariate Calibration. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 31(7), 1453–1460. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20200030>
- Gondim, C. de S., Junqueira, R. G., Souza, S. V. C. de, Ruisánchez, I., & Callao, M. P. (2017). Detection of several common adulterants in raw milk by MID-infrared spectroscopy and one-class and multi-class multivariate strategies. *Food Chemistry*, 230, 68–75. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.03.022>
- Grassi, S., Tarapoulouzi, M., D'Alessandro, A., Agriopoulou, S., Strani, L., & Varzakas, T. (2022). How Chemometrics Can Fight Milk Adulteration. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 139, 12(1), 139. <https://doi.org/10.3390/FOODS12010139>
- Hernández Morales, P., Estrada-Flores, J. G., Avilés-Nova, F., Yong-Angel, G., López-González, F., Solís-Méndez, A. D., & Castelán-Ortega, O. A. (2013). Tipificación de los sistemas campesinos de producción de leche del sur del estado de México. *Universidad y Ciencia*, 29(1), 19–31. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792013000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Huaman Quispe, R. I. (2023). *Evaluación de la calidad físico química por espectroscopia FTIR-ATR y análisis multivariado de la leche fresca expendida en el Cusco*. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/8122>

- Huillca Cutire, R. (2020). *Determinación de calidad físico - química de la leche cruda en época de lluvia en el Centro Poblado Urinsaya Ccollana – Layo*. <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/5440>
- Hurley, I. P., Ireland, H. E., Coleman, R. C., & Williams, J. H. H. (2004). Application of immunological methods for the detection of species adulteration in dairy products. *International Journal of Food Science and Technology*, 39(8), 873–878. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2004.00861.X>
- Jaiswal, P., Jha, S. N., Kaur, J., & Borah, A. (2017). Detection and quantification of anionic detergent (lissapol) in milk using attenuated total reflectance-Fourier Transform Infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 221, 815–821. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2016.11.095>
- Jawaid, S., Talpur, F. N., Sherazi, S. T. H., Nizamani, S. M., & Khaskheli, A. A. (2013a). Rapid detection of melamine adulteration in dairy milk by SB-ATR–Fourier transform infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 141(3), 3066–3071. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2013.05.106>
- Jawaid, S., Talpur, F. N., Sherazi, S. T. H., Nizamani, S. M., & Khaskheli, A. A. (2013b). Rapid detection of melamine adulteration in dairy milk by SB-ATR–Fourier transform infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 141(3), 3066–3071. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2013.05.106>
- Jha, S. N., Jaiswal, P., Borah, A., Gautam, A. K., & Srivastava, N. (2014). Detection and Quantification of Urea in Milk Using Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Food and Bioprocess Technology* 2014 8:4, 8(4), 926–933. <https://doi.org/10.1007/S11947-014-1455-Y>
- Jha, S. N., Jaiswal, P., Grewal, M. K., Gupta, M., & Bhardwaj, R. (2016). Detection of Adulterants and Contaminants in Liquid Foods—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(10), 1662–1684. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.798257;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Ji, Z., Zhang, J., Deng, C., Hu, Z., Du, Q., Guo, T., Wang, J., Fan, R., Han, R., & Yang, Y. (2023). Identification of mare milk adulteration with cow milk by liquid chromatography-high resolution mass spectrometry based on proteomics and metabolomics approaches. *Food Chemistry*, 405, 134901. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134901>

- Jolliffe, T. (2002). *Principal Component Analysis, Second Edition* (2da edición). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/B98835>
- Kasemsumran, S., Thanapase, W., & Kiatsoonthon, A. (2007). Feasibility of Near-Infrared Spectroscopy to Detect and to Quantify Adulterants in Cow Milk. *Analytical Sciences* 2007 23:7, 23(7), 907–910. <https://doi.org/10.2116/ANALSCI.23.907>
- Larkin, Peter. (2011). *Infrared and raman spectroscopy : principles and spectral interpretation* (Elsevier, Vol. 1). Elsevier.
- Limm, W., Karunathilaka, S. R., Yakes, B. J., & Mossoba, M. M. (2018). [논문]A portable mid-infrared spectrometer and a non-targeted chemometric approach for the rapid screening of economically motivated adulteration of milk powder. *International Dairy Journal*, 85, 177–183. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2018.06.005>
- Magariños, H. (2001). *Producción higiénica de la leche cruda: una guía para la pequeña y mediana empresa*. Editorial Piedra Santa. [https://biblos.usac.edu.gt/opac/record/2100?&mode=advanced&query=@field1=encabezamiento@value1=%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20ADMINISTRACION%20DE%20LA%20PRODUCCION%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20CONTROL&recnum=245](https://biblos.usac.edu.gt/opac/record/2100?&mode=advanced&query=@field1=encabezamiento@value1=%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20ADMINISTRACION%20DE%20LA%20PRODUCCION%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20CONTROL&recnum=245)
- Maraboli, A., Cattaneo, T. M. P., & Giangiacomo, R. (2002). Detection of vegetable proteins from soy, pea and wheat isolates in milk powder by near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 10(1), 63–69. <https://doi.org/10.1255/JNIRS.322;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Massart, D. L., Vandeginste, B. G. M., Buydens, L. M. C., De Jong, S., Lewi, P. J., & Smeyers-Verbeke, J. (1998). Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part A. In *Data Handling in Science and Technology* (Vol. 20, Issue PART A). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0922-3487\(97\)80032-9](https://doi.org/10.1016/S0922-3487(97)80032-9)
- Máximo Amaya, K. J. (2024). *Características físico-químicas de leche cruda que se expende en el mercado y ambulatoriamente en la ciudad de Pomalca, 2022* [Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/13246>

- Miller, J. N., & Miller, J. C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica* (4ta edición). Pearson educación, S.A. <https://sceqa.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/05/quimica-y-quimiometria.pdf>
- Mohamed, H., Nagy, P., Agbaba, J., & Kamal-Eldin, A. (2021). Use of near and mid infra-red spectroscopy for analysis of protein, fat, lactose and total solids in raw cow and camel milk. *Food Chemistry*, *334*, 127436. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127436>
- Mohanan, S., Thomas Panicker, P. G., Iype, L., Laila, M., Domini, I., & Bindu, R. G. (2002). A new ultrasonic method to detect chemical additives in branded milk. *Pramana* 2002 *59:3*, 59(3), 525–529. <https://doi.org/10.1007/S12043-002-0049-9>
- Mondragón Cortez, P. (2020). *Principios y aplicaciones de la espectroscopia de infrarrojo en el análisis de alimentos y bebidas* (1era Edicion).
- Mongay Fernández, Carlos. (2005). *Quimiometría*. Publicacions de la Universitat de València.
- Motolinia, C. N., Macuil, D. R., Ruiz, E. H., & Valencia, M. B. (2016). *Determinacion de agregados de betalactoglobulina en leche mediante espectroscopia vibracional de infrarrojo*. *1*(1), 232–237.
- Musa, M. A., & Yang, S. (2021). Detection and quantification of cow milk adulteration using portable near-infrared spectroscopy combined with chemometrics. *African Journal of Agricultural Research*, *17*(2), 198–207. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15321>
- Nagraik, R., Kaushal, A., Gupta, S., & Kumar, D. (2019). PCR based genetic marker for the detection of *Leptospira interrogans* causing leptospirosis. *Vegetos* 2019 *33:1*, 33(1), 21–25. <https://doi.org/10.1007/S42535-019-00078-5>
- P., A. P., S., M. G., E., P. C., & S., Z. R. (2023). PRODUCTIVIDAD LECHERA EN VACAS HOLSTEIN DE LA CUENCA DE LIMA – PERÚ. *Anales Científicos*, *84*(1), 68–83. <https://doi.org/10.21704/AC.V84I1.1857>
- Paucar Huaman, S. S. (2023). *Evaluación de la calidad composicional de la leche en hatos bovinos del Valle del Mantaro - región Junín*. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/9358>

- Paulino Salgado, E. (2006). *Manual de espectroscopia, fundamentos y resolución de espectros de ultravioleta-visible e infrarrojo* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000611071>
- Pereira, E. V. dos S., Fernandes, D. D. de S., de Araújo, M. C. U., Diniz, P. H. G. D., & Maciel, M. I. S. (2020). Simultaneous determination of goat milk adulteration with cow milk and their fat and protein contents using NIR spectroscopy and PLS algorithms. *LWT*, *127*, 109427. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109427>
- Perez-Gonzalez, C., Garcia-Hernandez, C., Garcia-Cabezon, C., Rodriguez-Mendez, M. L., Dias, L., & Martin-Pedrosa, F. (2024). Analysis of milk adulteration by means of a potentiometric electronic tongue. *Journal of Dairy Science*, *107*(11), 9135–9144. <https://doi.org/10.3168/JDS.2024-25140>
- Pesic, M., Barac, M., Vrvic, M., Ristic, N., Macej, O., & Stanojevic, S. (2011). Qualitative and quantitative analysis of bovine milk adulteration in caprine and ovine milks using native-PAGE. *Food Chemistry*, *125*(4), 1443–1449. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2010.10.045>
- Puig Bertotto, J. (2022). Aplicación de la espectroscopia vibracional como técnica de control en la industria farmacéutica [Universitat Autònoma de Barcelona]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/687921>
- Ravinder, D., Gowtham, P., Khatri, K., Pawar, S. C., & Botlagunta, M. (2021). Comparison of Various Milk Samples Using Spectroscopy Chromatography, and Microscopic Analysis. *Journal of Food Science and Nutrition Research*, *04*(01). <https://doi.org/10.26502/JFSNR.2642-11000059>
- Rodiles López, J. O., Trujillo-Aguirre, R. M., & Vega, R. Z. (2022). La Leche y los derivados lácteos. *Milenaria, Ciencia y Arte*, *20*, 34–38. <https://doi.org/10.35830/MCYA.VI20.329>
- Salih, M. A. M., & Yang, S. (2017). Common Milk Adulteration in Developing Countries Cases Study in China and Sudan: A Review. *Advances in Dairy Research*, *5*(4), 1–4. <https://doi.org/10.4172/2329-888X.1000192>
- Salleh, N. A., Selamat, J., Meng, G. Y., Abas, F., Jambari, N. N., & Khatib, A. (2019). Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis of milk from different goat breeds. *International Journal of Food Properties*, *22*(1), 1673–1683.

<https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1668803>;JOURNAL:JOURNAL:LJFP20;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:LJFP20;ISSUE:ISSUE:DOI

- Santos, P. M., Pereira-Filho, E. R., & Rodriguez-Saona, L. E. (2013). Application of Hand-Held and Portable Infrared Spectrometers in Bovine Milk Analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(6), 1205–1211. <https://doi.org/10.1021/JF303814G>
- Singh, P., & Gandhi, N. (2015). Milk Preservatives and Adulterants: Processing, Regulatory and Safety Issues. *Food Reviews International*, *31*(3), 236–261. <https://doi.org/10.1080/87559129.2014.994818>;SUBPAGE:STRING:ACCESS
- Sonvanshi, V., Gandhi, K., Ramani, A., Sharma, R., & Seth, R. (2024). ATR-FTIR coupled with chemometric techniques to detect vanaspati ghee (hydrogenated vegetable oil) adulteration in milk fat. *Results in Chemistry*, *7*, 101343. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2024.101343>
- Statsenko, L., & Guharay, F. (2015). *Procesamiento de leche y elaboración de productos lácteos*. <https://hdl.handle.net/10568/70088>
- Teixeira, J. L. da P., Caramês, E. T. dos S., Baptista, D. P., Gigante, M. L., & Pallone, J. A. L. (2020). Vibrational spectroscopy and chemometrics tools for authenticity and improvement the safety control in goat milk. *Food Control*, *112*, 107105. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2020.107105>
- Teixeira, R. C., Luiz, L. C., Junqueira, G. M. A., Bell, M. J. V., & Anjos, V. C. (2020). Detection of antibiotic residues in Cow's milk: A theoretical and experimental vibrational study. *Journal of Molecular Structure*, *1215*, 128221. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2020.128221>
- Tena, N., Aparicio, R., & García-González, D. L. (2017). Virgin olive oil stability study by mesh cell-FTIR spectroscopy. *Talanta*, *167*, 453–461. <https://doi.org/10.1016/J.TALANTA.2017.02.042>
- Tunjar García, W. A. (2024a). *Detección de adulteración en leche fresca aplicando Espectrometría Infrarrojo Cercano en la región San Martín*.
- Tunjar García, W. A. (2024b). *Detección de adulteración en leche fresca aplicando Espectrometría Infrarrojo Cercano en la región San Martín* [Universidad Nacional de San Martín]. <https://hdl.handle.net/11458/6313>

- Tunjar García, W. A. (2024c). *Detección de adulteración en leche fresca aplicando Espectrometría Infrarrojo Cercano en la región San Martín.*
- Tunjar García, W. A. (2024d). *Detección de adulteración en leche fresca aplicando Espectrometría Infrarrojo Cercano en la región San Martín.*
- Villa Uvidia, D. N. (2015). *Efecto de la variación de la temperatura en la calidad de la leche, en el centro de acopio madrillac del cantón guano.* Universidad agraria del ecuador.
- Villanueva, E., Ore-Quiroz, H. P. J., Prieto-Rosales, G. P., Veliz-Sagarvinaga, R. N., Chavez-Solano, Y. M., Aguirre, E., Puma-Isuiza, G., & Hurtado-Soria, B. Z. (2025). Physicochemical Profiling, Bioactive Properties, and Spectroscopic Fingerprinting of Cow's Milk from the Pampas Valley (Tayacaja, Peru): A Chemometric Approach to Geographical Differentiation. *Molecules* 2025, Vol. 30, Page 4484, 30(22), 4484. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES30224484>
- Villanueva López, E. (2021). *Espectroscopía vibracional aplicada a la determinación de residuos de pesticidas en Cacao (Theobroma cacao L.)* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4582>
- Visconti, L. G. (2023). “*Determinación de la adulteración de quesos rallados mediante metodologías analíticas de screening y análisis multivariante.*” Universidad nacional del sur.
- Vitale, R., Cocchi, M., Biancolillo, A., Ruckebusch, C., & Marini, F. (2023). Class modelling by Soft Independent Modelling of Class Analogy: why, when, how? A tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 1270, 341304. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2023.341304>
- Viviana, A., Cordon, H., Steven, C., & Monroy, P. (n.d.). *Propuesta para el control de la adulteración en leche cruda con la adición de lactosuero por medio de una cromatografía líquida de alta eficacia (hplc) en alqueria.*
- Xin, H., & Stone, R. (2008). Chinese Probe Unmasks High-Tech Adulteration With Melamine. *Science*, 322(5906), 1310–1311. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.322.5906.1310>
- Zou, H., & Hastie, T. (2005). Regularization and Variable Selection via the Elastic Net. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*, 301–320. <https://www.jstor.org/stable/3647580>

## IX. ANEXOS

### ANEXO 1: Acercamiento con los productores y asociaciones



**Fotografía 1:** Primeros acercamientos con los productores para realizar las encuestas

## ANEXO 2: Recolección de datos



**Fotografía 2:** Encuesta a los productores y acopiadores de leche de ganado vacuno.



**Fotografía 3:** Reconocimiento de campo

### ANEXO 3: Recolección de muestras



**Fotografía 4:** Colecta de leche de vaca del valle de pampas de diferentes establos.



**Fotografía 5:** Ordeño manual



**Fotografía 6:** Ordeño mecánico



**Fotografía 7:** Recolección de leche de los distintos distritos del valle

**ANEXO 4: Acondicionamiento de muestras**



**Fotografía 8:** Traslado de muestras



**Fotografía 9:** Rotulado de muestras



**Fotografía 10:** Almacenado de muestras a 6 °C.

#### ANEXO 4: Identificación de adulteraciones simulados artificialmente



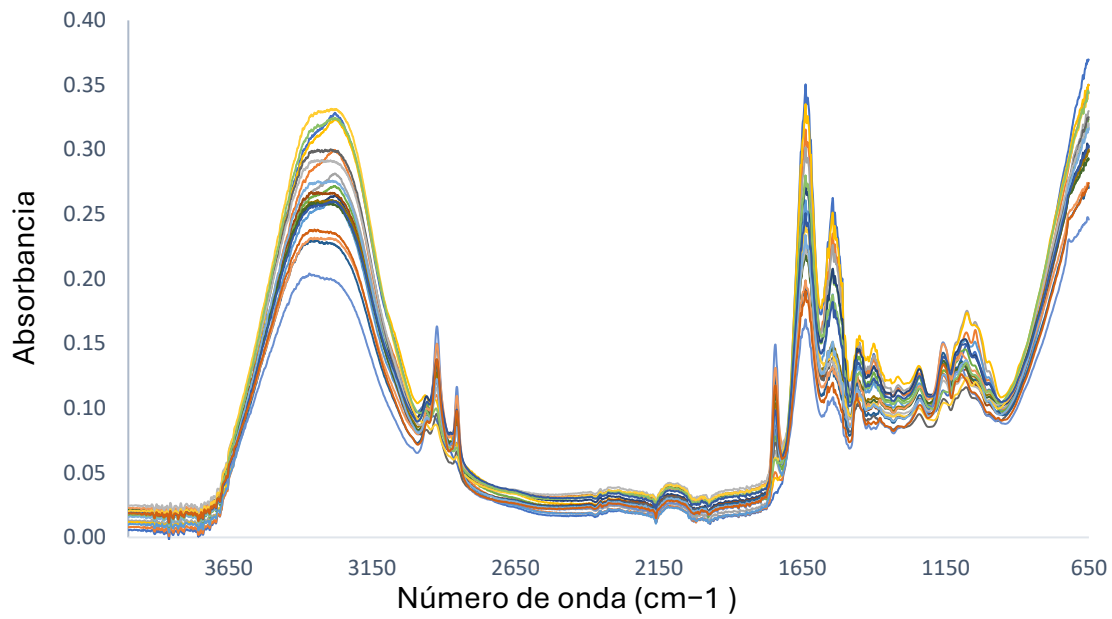
**Fotografía 11:** Análisis sensorial – Prueba de comparación pareada



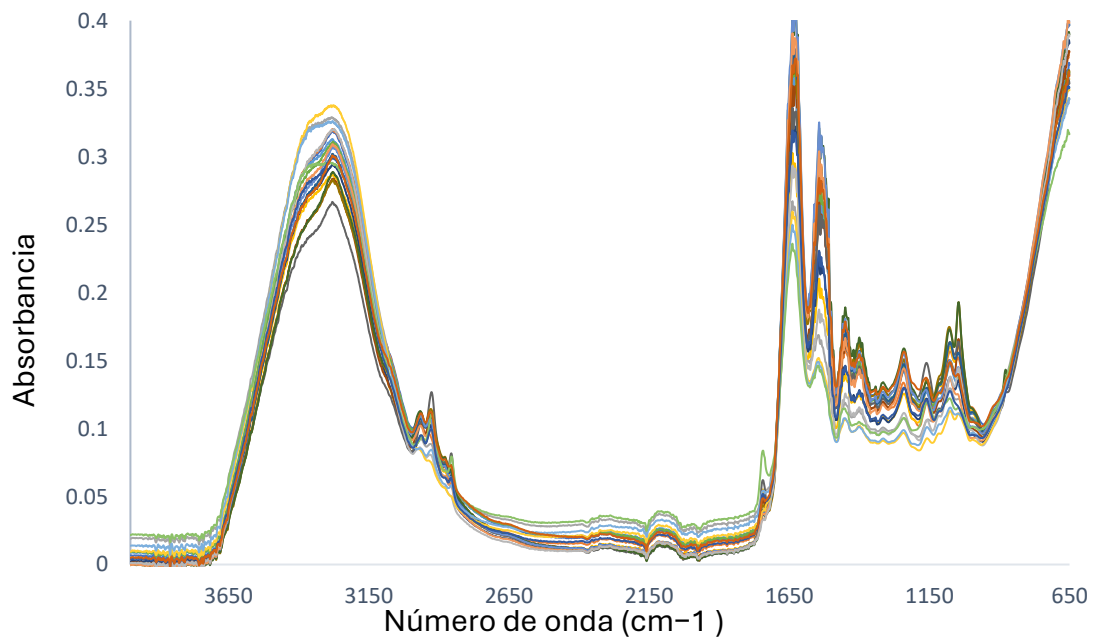
**Fotografía 12:** Identificación de muestras adulteradas simuladas mediante percepción del umbral mínimo.

**ANEXO 5:** Resultados del perfil vibracional de muestras adulteradas

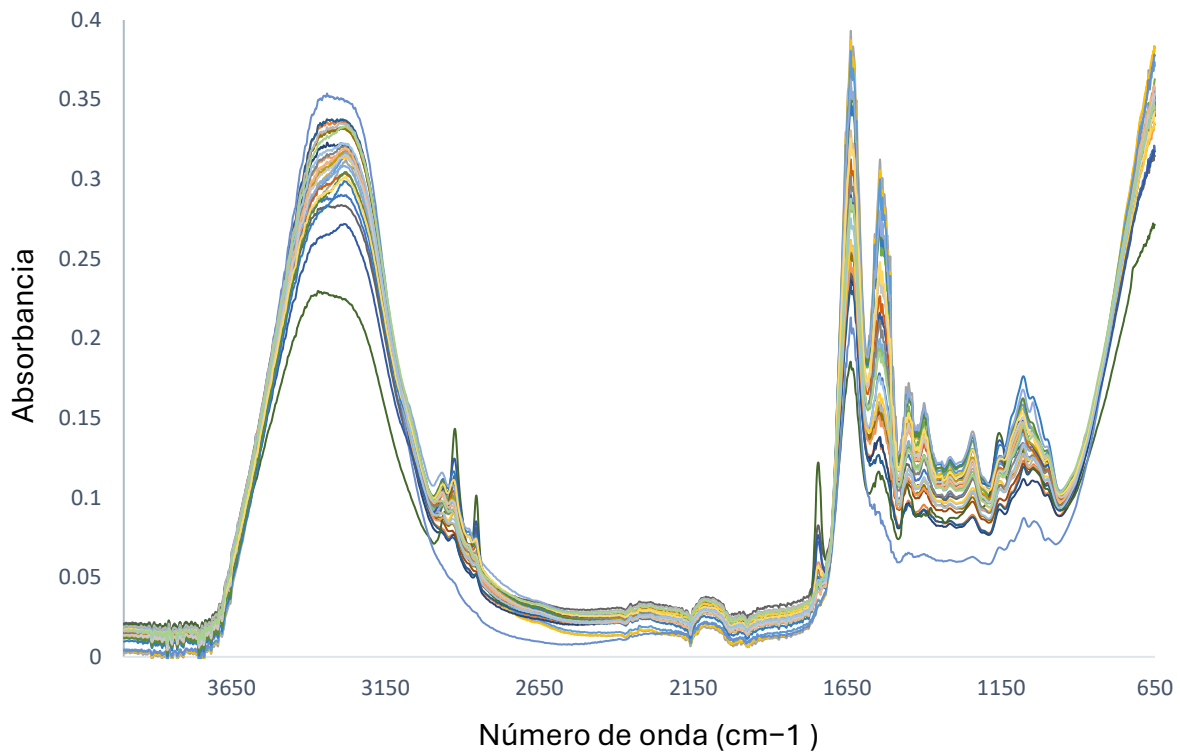
Perfil vibracional de muestras adulteradas simuladas con agua.



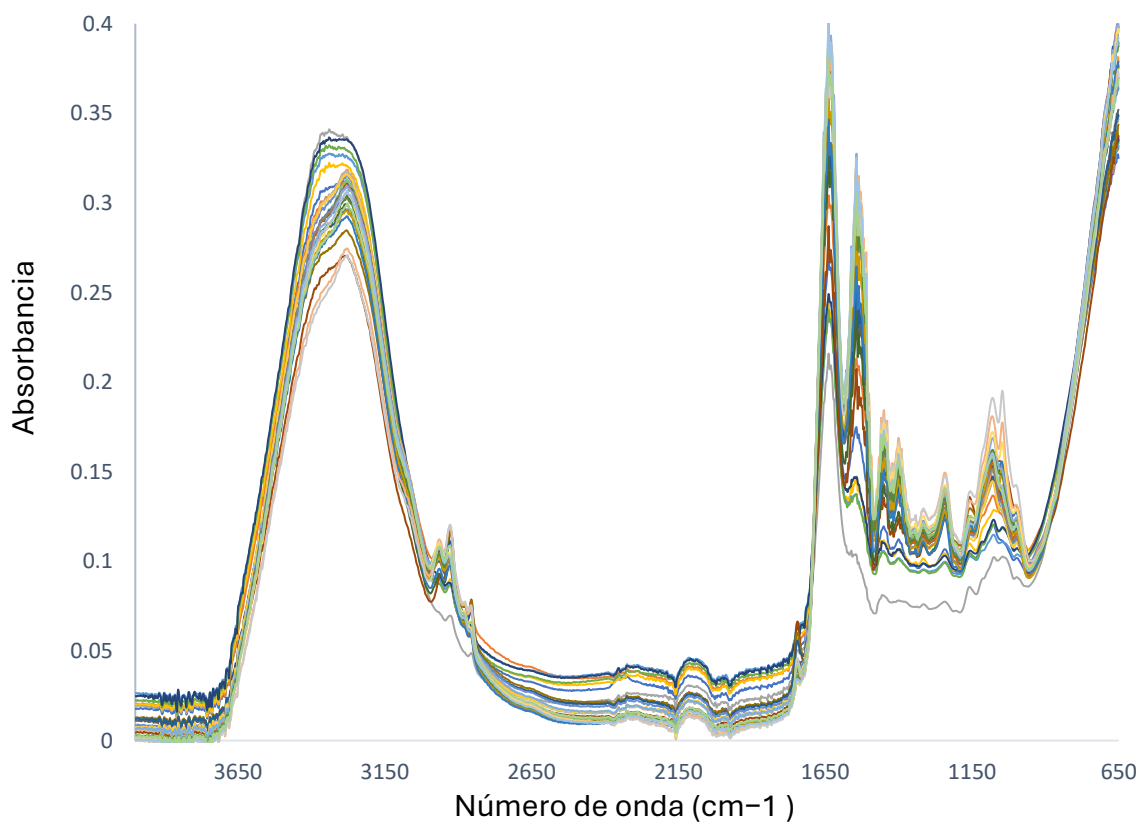
Perfil vibracional de muestras adulteradas simuladas con leche en polvo.



Perfil vibracional de muestras adulteradas simuladas con almidón (maicena).



Perfil vibracional de muestras adulteradas simuladas con suero lácteo.



## Anexo 06: Ficha de encuesta para identificación de zonas productoras



### ENCUESTA DE PRODUCCIÓN DE LECHE

La presente encuesta nos servirá para determinar el potencial lechero existente en el valle de Pampas, para lo cual le rogamos contestar con la mayor veracidad.

#### I. DATOS PERSONALES

Nombre: \_\_\_\_\_ Celular: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### I. LUGAR DE PRODUCCIÓN

Distrito: \_\_\_\_\_ Localidad: \_\_\_\_\_

#### II. DATOS DE PRODUCCIÓN

1. Completa la siguiente información:

Raza	Número	En producción	Producción promedio litros/día	Preñadas
<b>TOTAL</b>				

2. ¿Cuál es el costo de venta de la leche en el mercado? \_\_\_\_\_

3. ¿Qué tipo de ordeño practica? Manual \_\_\_\_\_ Mecánico \_\_\_\_\_

## Anexo 07: Ficha de análisis sensorial para identificación de adulteraciones

Nombre: \_\_\_\_\_ fecha: \_\_\_\_\_

INSTRUCCIONES: Pruebe cada par de producto de izquierda a derecha, luego marque con un círculo el producto que no encontró diferencias. No se trague las muestras, y enjuáguese la boca entre cada par. Gracias:

Par	Muestras
1 (434)	345
	234
	543
2 (434)	732
	273
	723
3 (434)	473
	374
	743
4 (434)	568
	865
	658

### COMENTARIOS

1. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
2. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
4. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_